

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky**

**Laboratorní stanoviště s elektrickým
dmychadlem pro testování vlastností snímačů
tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu**

**Laboratory Stand with Electric Blower for
Testing the Properties of Air Pressure Sensors
and Air Mass Sensors**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Haščák**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: Laboratorní stanoviště s elektrickým dmychadlem pro testování
vlastností snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu
Laboratory Stand with Electric Blower for Testing the Properties of Air
Pressure Sensors and Air Mass Sensors

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu rozsahu hodnot hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu u atmosférických a přeplňovaných spalovacích motorů.
2. Teoreticky rozeberte principy vybraných typů snímačů hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu.
3. Na základě výsledků bodu 1 a dle specifikace vedoucího diplomové práce proveďte návrh a realizaci zařízení s využitím elektrického dmychadla pro testování vlastností snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu.
4. Praktickým měřením ověřte funkčnost zařízení a vypracujte laboratorní úlohu pro praktickou výuku předmětu Diagnostika a testování vozidel.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle specifikace vedoucího diplomové práce.

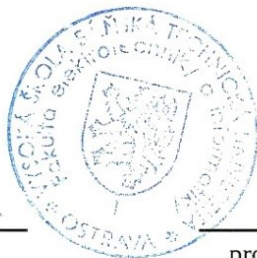
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

*„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne 6. 5. 2013



.....
Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky k obsahu a formě zpracování této práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá stavbou laboratorního pracoviště pro testování snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu. V teoretické části analyzuje rozsah hodnot hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu u vznětových a zážehových motorů, uvádí výpočet těchto hodnot a příklady pro různá vozidla. Dále přibližuje princip funkce vybraných typů snímačů hmotnosti vzduchu, snímačů barometrického tlaku a tlaku nasávaného vzduchu.

Další částí této práce je praktická část, ve které je detailně rozebrán návrh stanoviště pro měření snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu, podle kterého bylo toto stanoviště realizováno. Popis je rozdělen na část, která se zabývá mechanickým návrhem a na část zabývající se elektronickým návrhem. Na závěr je zde umístěna vzorová laboratorní úloha s výsledky měření na tomto stanovišti.

Klíčová slova:

Snímač hmotnosti vzduchu, MAF, MAP, snímač tlaku, PWM, turbodmychadlo.

Abstract

This diploma thesis pertains to the construction of a laboratory workplace intended to test pressure and air mass sensors. The theoretical part focuses on analyzing the value range of air mass and pressure of the intake air for diesel and gasoline engines, then there is displayed the calculation of these values along with examples for different types of vehicles. It further explains both function and principle of chosen air mass sensor types as well as barometric pressure sensor and pressure of intake air.

The next part of the thesis is dedicated to the practical insight into a thoroughly described scheme of station constructed for measurement of pressure and air mass sensors, based on which this station was implemented. The description is divided into two parts - the first one deals with a mechanical draft and the second part deals with electronic draft. At the end, there is inserted a sample laboratory task that includes results that were measured at this station.

Key words:

Air mass sensor, MAF, MAP, pressure sensor, PWM, turbocharger.

Obsah:

| | |
|---|-----------|
| 1. ÚVOD | 7 |
| 2. TEORETICKÝ ROZBOR, ANALÝZY A VÝPOČTY | 8 |
| 2.1 Analýza rozsahu hodnot hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu u atmosférických a přepřínovaných spalovacích motorů | 8 |
| 2.1.1 Elektronické řízení motorů | 8 |
| 2.1.2 Kvantitativní regulace..... | 8 |
| 2.1.3 Kvalitativní regulace..... | 9 |
| 2.1.4 Smíšená regulace | 10 |
| 2.1.5 Řízení a výpočet výkonu motoru | 11 |
| 2.1.6 Teoretický výpočet a měření hmotnosti nasávaného vzduchu pro různá vozidla | 13 |
| 2.2 Principy vybraných typů snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu..... | 15 |
| 2.2.1 Snímače hmotnosti vzduchu HFM 2 | 15 |
| 2.2.2 Snímače hmotnosti vzduchu HFM 5 | 16 |
| 2.2.3 Modernější snímače hmotnosti vzduchu HFM 6 | 19 |
| 2.3 Principy vybraných typů snímačů tlaku | 21 |
| 2.3.1 Snímače barometrického tlaku | 22 |
| 2.3.2 Snímače tlaku nasávaného vzduchu | 23 |
| 3. PRAKTICKÁ REALIZACE A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ | 25 |
| 3.1 Základní požadované vlastnosti stanoviště pro měření snímačů hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu | 25 |
| 3.1.1 Regulace množství protékajícího vzduchu | 25 |
| 3.1.2 Regulace tlaku v potrubí se snímačem tlaku..... | 25 |
| 3.1.3 Požadavek na mazání použitého turbodmychadla | 25 |
| 3.1.4 Snadná výměna snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu a snímačů tlaku..... | 26 |
| 3.1.5 Regulace teploty vzduchu..... | 26 |
| 3.1.6 Snadná manipulace s celým stanovištěm..... | 26 |
| 3.2 Mechanická konstrukce..... | 26 |
| 3.3 Koncepce elektroniky měřicího stanoviště..... | 28 |
| 3.3.1 Základní deska a popis použitého mikrokontroleru a jeho periférií | 29 |
| 3.3.2 Deska koncových stupňů pro řízení ventilátoru a topné spirály | 33 |
| 3.3.3 Deska s analogovými vstupy | 35 |
| 3.3.4 Deska zdroje | 36 |
| 3.4 Ověření funkčnosti stanoviště a laboratorní úloha | 39 |
| 3.4.1 Měření snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu | 39 |
| 3.4.2 Měření snímače tlaku..... | 42 |
| 3.4.3 Laboratorní úloha | 44 |
| 4. ZÁVĚR..... | 45 |
| 5. POUŽITÉ ZDROJE A CITACE | 46 |
| 6. SEZNAM OBRÁZKŮ A PŘÍLOH | 47 |

1. Úvod

Elektronika v motorovém vozidle je v současné době velmi důležitou a neoddělitelnou částí každého vozu. Umožňuje nám zásadně změnit chování vozu jako celku, tak i jeho jednotlivých součástí a docílit tak co nejlepších požadovaných vlastností. Ve vozidlech přibývá postupem času velké množství různých snímačů fyzikálních veličin, řídicích jednotek a elektronických akčních členů. Díky neustálým inovacím v systémech elektronického řízení motoru je docíleno stále se zmenšující spotřeby paliva, současně s větším výkonem motoru. Dalším důvodem pro neustálý vývoj jsou stále přísnější ekologické požadavky na nově vyrobené automobily, které musí plnit stále přísnější emisní normy stanovené zákonodárci.

Mezi nejdůležitější snímače v motorových vozidlech patří snímač MAF (Mass Air Flow sensor) sensor, který měří hmotnost nasávaného vzduchu motorem. Změřená hodnota hmotnosti vzduchu se pak používá pro výpočet přesné dávky vstřikovaného paliva, dále se dle této hodnoty stanovuje zatížení motoru. Pokud bychom tedy nezohledňovali množství nasávaného vzduchu motorem, bylo by množství vstřikovaného paliva do motoru příliš vysoké a motor by byl méně hospodárný. Snímač MAF má ale i své nevýhody: způsobuje restrikcí sacího potrubí, je velmi náchylný na netěsnosti a zanášení. Další možností pro získání informace o okamžitém zatížení motoru je použití snímač MAP (manifold absolute pressure sensor), neboli snímač absolutního tlaku v sacím potrubí. Jeho funkce je klíčová pro stanovení optimální vstřikované dávky paliva a správného předstihu. Tento snímač nezpůsobuje restrikcí sacího potrubí, nepodléhá zkreslením a poruchám jako MAF snímač a proto je vhodný při použití v turbo-aplikacích. Údaje z MAP senzoru představují skutečnou zátěž motoru a ve spojení s otáčkami jeho skutečnou objemovou účinnost, která je skutečným měřítkem dodávky paliva.

Diplomová práce je rozdělena na dvě základní části. V první části jsou podrobně analyzovány rozsahy hodnot hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu u atmosférických a přeplňovaných spalovacích motorů a jsou zde podrobně popsány principy funkce vybraných typů snímačů těchto veličin. Za účelem pohodlného měření vlastností každého z výše popsaných snímačů, bez nutnosti vozu, ve kterém by musely být namontovány, bylo vytvořeno laboratorní stanoviště s turbodmychadlem a ventilátorem, pomocí kterého lze snadno změřit vlastnosti velké části snímačů MAF a MAP v dostatečném rozsahu. Jedná se o druhou část této diplomové práce a je zde podrobně popsán způsob návrhu a konstrukce tohoto stanoviště.

2. TEORETICKÝ ROZBOR, ANALÝZY A VÝPOČTY

2.1 Analýza rozsahu hodnot hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu u atmosférických a přeplňovaných spalovacích motorů

2.1.1 Elektronické řízení motorů

Atmosférické motory čerpají vzduch pro spalovací komory při klasických atmosférických podmínkách. Při pohybu pístu směrem dolů se otvírají nasávací kanálky, aby umožnili pístu nasát potřebné množství vzduchu do své komory. Přeplňované motory využívají pro zvýšení tlaku nasávaného vzduchu vstupujícího do motoru čerpadlo. Větší množství vzduchu umožňuje zapálení většího množství paliva, čímž se výrazně zvyšuje síla produkovaná motorem. Pro provoz motoru je potřebná určitá kombinace vzduchu a paliva. Teoreticky je pro úplné spalování potřeba 14,7 kg vzduchu na 1 kg paliva. Tomuto poměru se říká též stechiometrický poměr. Jelikož provoz motoru není udržován pouze v jednom stavu, je potřeba složení této směsi korigovat, například při změně zatížení motoru. Tím se tedy mění i spotřeba spalovacího motoru, která je na stechiometrickém poměru závislá.

Současné motory jsou ovšem většinu času provozovány v oblasti částečného zatížení. Při tomto zatížení je vhodné, pro snížení spotřeby motoru, aby směs dodávaná do válců byla chudá, tj. přebytek vzduchu. Pro ostatní oblasti provozu motoru je zapotřebí zase jiný poměr této směsi, např. pro požadavek plného výkonu je zapotřebí bohatá směs, tj. přebytek paliva.

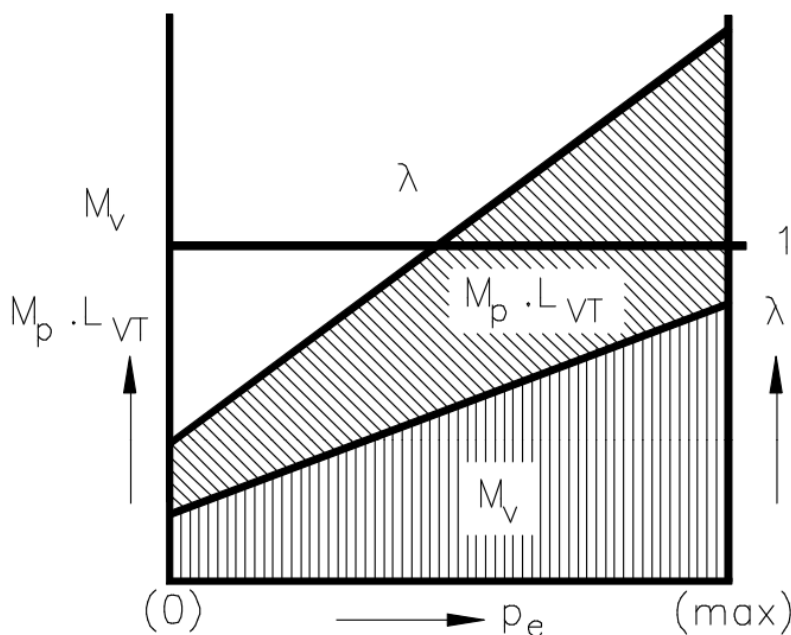
K rozpoznání toho, jak se odlišuje skutečný poměr vzduchu a paliva od teoretického byl zaveden součinitel přebytku vzduchu λ (lambda). Tento koeficient udává informaci o příslušném směšovací poměru vzduchu a paliva. Pokud je například ve směsi obsaženo více paliva, což odpovídá bohaté směsi, tak motor pracuje s nedostatkem vzduchu. Koeficient přebytku vzduchu $\lambda < 1$. Naopak dojde-li k tomu, že ve směsi je menší množství paliva a větší množství vzduchu, mluvíme o chudé směsi. Ve spalovacím prostoru panuje přebytek vzduchu. Příslušný koeficient přebytku vzduchu $\lambda > 1$. Zážehové motory dosahují nejvyššího výkonu při 5 až 15 % nedostatku vzduchu, tedy při $\lambda = 0,95$ až $0,85$. Při 10 až 20 % přebytku vzduchu, tedy při $\lambda = 1,1$ až $1,2$ dosahují tyto motory zase nejlepší spotřeby paliva. V praxi tedy neexistuje ideální hodnoty přebytku vzduchu a tak se volí $\lambda = 0,9$ až $1,1$.

Regulaci výkonu zážehových a vznětových motorů můžeme rozdělit do tří základních skupin:

2.1.2 Kvantitativní regulace

Při tomto způsobu řízení výkonu motoru se mění množství směsi (paliva se vzduchem) vstupující do válce motoru, jedná se tedy o změnu hmotnostního naplnění válce čerstvou náplní. Tato směs má většinou konstantní bohatost, která je zpravidla blízká stechiometrickému poměru ($\lambda=1$). S množstvím paliva (M_p) se musí měnit i množství spalovacího vzduchu (M_v). Regulace se provádí tak, že se nastavuje množství spalovacího vzduchu pomocí škrticí klapky v sání motoru a podle množství vzduchu se přidává odpovídající poměr paliva. Škrticí klapka je spřažena s plynovým pedálem vozidla, podle sešlápnutí plynového pedálu se mění natočení klapky, a tím i průřez sacího potrubí. Se změnou průřezu sacího potrubí se mění množství nasávaného vzduchu. Regulace je určena

pro zážehové motory, výjimku tvoří pouze zážehové motory s přímým vstřikem paliva, které pracují se smíšenou regulací. Je výhodnější, když složení směsi je mírně ochuzeno proti $\lambda = 1$, protože bude k dispozici více kyslíku, čímž se zvýší pravděpodobnost dobrého spalování.

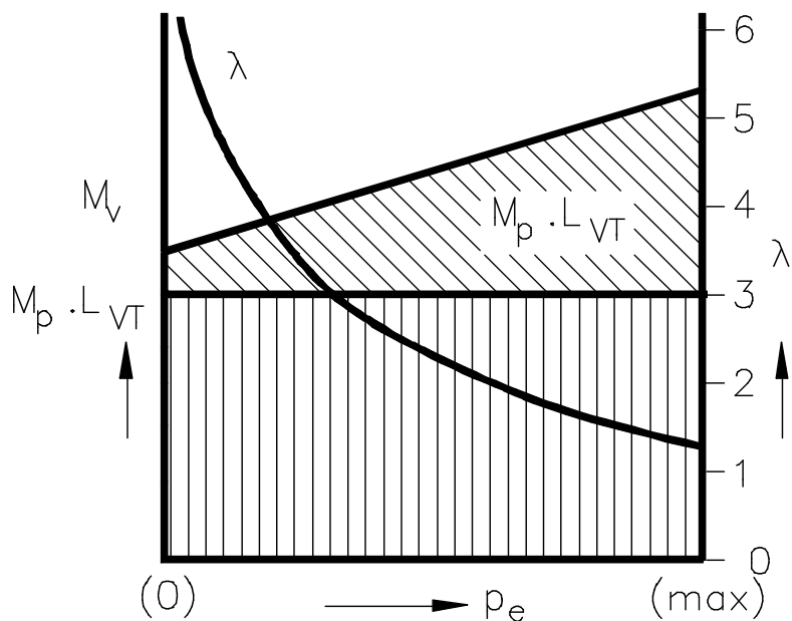


Obr. 1 Schéma kvantitativní regulace [3]

Legenda k obrázku 1: M_p množství paliva [kg/h], M_v množství vzduchu [kg/h], p_e střední efektivní tlak [MPa], λ součinitel přebytku vzduchu [-], L_{vT} teoretické množství suchého vzduchu potřebné k dokonalé oxidaci 1 kg paliva [kg/kg]

2.1.3 Kvalitativní regulace

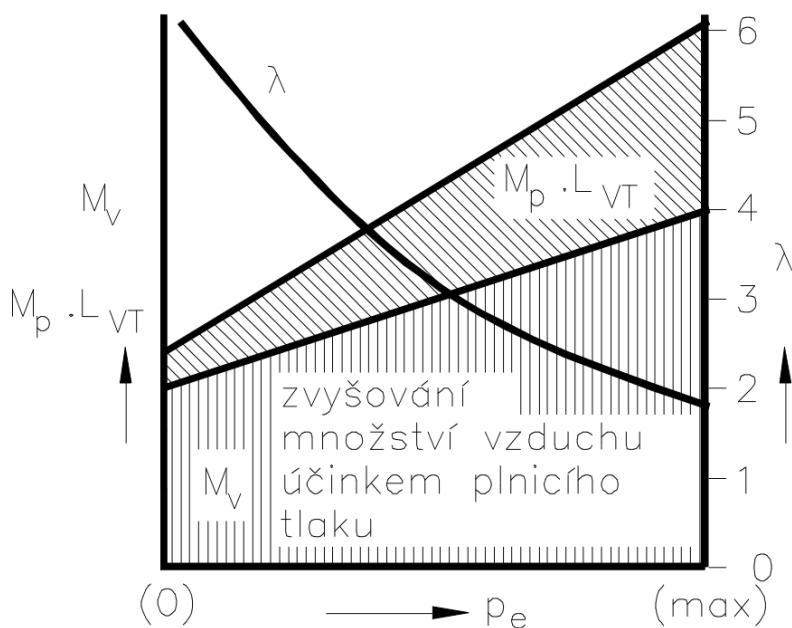
Dalším způsobem řízení výkonu motoru je dodáváním množství paliva, přičemž množství nasávaného vzduchu není omezováno a tedy není zde použita škrtecí klapka. To se děje řízením vstřikované dávky paliva ve vstřikovacím zařízení. Při kvalitativní regulaci se tak může měnit složení náplně, která je dodávána do válce motoru (změna bohatosti směsi). S klesajícím zatížením se přivádí do válce menší množství paliva a je zde tedy větší přebytek vzduchu, vzniká chudá směs. Ta je poměrně vzdálená od stechiometrické hodnoty. Kvalitativní regulace je určena především pro vznětové nepřepřlňované motory. Stechiometrický směšovací poměr u vznětových motorů je asi 14,5 kg vzduchu na 1 kg paliva ($\lambda = 1$). Mez kouření vznětových motorů je však pro $\lambda \approx 1,4$. Důvodem je nerovnoměrné tvoření směsi, které u naftového motoru probíhá teprve ve válci. Směs proto není homogenní, což znamená, že při spalování existuje částečně nedostatek vzduchu a částečně nedostatek paliva. Moderní naftové motory pracují při chodu naprázdno s mimořádně chudou směsí $\lambda \approx 3,4$. Při plném zatížení je směs obohacena až na mez kouření $\lambda \approx 1,4$.



Obr. 2 Schéma kvalitativní regulace [3]

2.1.4 Smíšená regulace

Při této regulaci je využíváno výhodných vlastností kvalitativní a kvantitativní regulace. Střední efektivní tlak a tedy výkon motoru v určité oblasti zatížení je řízen změnou bohatosti směsi nasávané do válce motoru. V jiné oblasti je řízen změnou hmotnostního plnění válce, přitom oblast s proměnlivou bohatostí směsi je zpravidla určitým způsobem řízena i kvantitativně. Tento způsob regulace využívají přeplňované vznětové motory a také zážehové motory s přímým vstřikem paliva spalující vrstvenou směs.



Obr. 3 Přeplňovaný vznětový motor [3]

2.1.5 Řízení a výpočet výkonu motoru

Výkon motoru P_e lze měnit změnou točivého momentu M_t , nebo otáčkami n , případně současnou změnou točivého momentu i otáček [3].

$$P_e = M_t \cdot \frac{2\pi \cdot n_{mot}}{60 \cdot 10^3} = \frac{p_e \cdot V_z \cdot n_{mot}}{120} \quad (1)$$

$$p_e = \frac{2 \cdot 2\pi}{V_z} \cdot M_t = \frac{120}{V_z \cdot n} \cdot P_e \quad (2)$$

Přičemž P_e je efektivní výkon motoru [kW], p_e střední efektivní tlak [MPa], M_t točivý moment [Nm], n_{mot} otáčky motoru [min^{-1}], V_z zdvihový objem motoru [dm^3].

Výkon motoru je přímo úměrný hmotnostnímu toku paliva do motoru [3]:

$$P_e = m_p \cdot H_u \cdot \eta_c \quad (3)$$

$$m_p = \frac{m_v}{\lambda \cdot L_{VT}} \quad (4)$$

$$m_v = V_z \cdot \frac{n_{mot}}{k \cdot 60} \cdot \rho_v \cdot \eta_d \quad (5)$$

$$p_e = \frac{H_u}{\lambda \cdot L_{VT}} \cdot \rho_v \cdot \eta_d \cdot \eta_c \quad (6)$$

Kde m_p je hmotnostní tok paliva do motoru [kg s^{-1}], m_v hmotnostní tok vzduchu do motoru [kg s^{-1}], H_u výhřevnost paliva [MJ/kg], η_c celková účinnost motoru [-], η_d dopravní účinnost [-], λ součinitel přebytku vzduchu [-], ρ_v hustota vzduchu [kg/m^3].

Hustota vzduchu se mění v závislosti na tlaku. Pro správné určení hustoty vzduchu v motoru automobilu je tedy zapotřebí znát tlak v sacím potrubí. Hustotu vzduchu je možné vypočítat podle vztahu

$$\rho_v = \frac{p_s \cdot M}{R \cdot T}, \quad (7)$$

kde p_s je střední efektivní tlak [MPa], M molární hmotnost vzduchu [kg/mol], R univerzální plynová konstanta [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$], T teplota [K].

Příklad výpočtu efektivního výkonu motoru pro čtyřdobý zážehový motor při různém zatížení [3]:

$V_z = 1,4 \text{ dm}^3$, $n_{mot} = 5000 \text{ min}^{-1}$, palivo BA, $H_u = 42,5 \text{ MJ/kg}$, $L_{VT} = 14,5 \text{ kg/kg}$

Výpočet pro 100% zatížení

$\lambda = 1$, $\eta_d = 0,85$, $\eta_c = 0,30$, $p_s = 1 \text{ bar}$, $p_b = 1 \text{ bar}$, $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_v = 1,16 \text{ kg/m}^3$

$$P_e = m_p \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{m_v}{\lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{V_z \cdot 10^{-3} \cdot n_{mot} \cdot \rho_v \cdot \eta_d}{2 \cdot 60 \cdot \lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot 10^3 \cdot \eta_c \quad (8)$$

$$P_e = 50,6 \text{ kW} \quad (9)$$

Výpočet pro částečné zatížení

$\lambda = 1$, $\eta_d = 0,85$, $\eta_c = 0,26$, $p_s = 0,6 \text{ bar}$, $p_b = 1 \text{ bar}$, $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_v = 0,7 \text{ kg/m}^3$

$$P_e = m_p \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{m_v}{\lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{V_z \cdot 10^{-3} \cdot n_{mot} \cdot \rho_v \cdot \eta_d}{2 \cdot 60 \cdot \lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot 10^3 \cdot \eta_c \quad (10)$$

$$P_e = 26,4 \text{ kW} \quad (11)$$

Příklad výpočtu efektivního výkonu motoru pro čtyřdobý nepřepřlňovaný vznětový motor při různém zatížení [3]:

$V_z = 1,9 \text{ dm}^3$, $n_{mot} = 4000 \text{ min}^{-1}$, palivo NM, $H_u = 42,5 \text{ MJ/kg}$, $L_{VT} = 14,5 \text{ kg/kg}$

Výpočet pro 100% zatížení

$\lambda = 1,3$, $\eta_d = 0,85$, $\eta_c = 0,36$, $p_b = 1 \text{ bar}$, $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_v = 1,16 \text{ kg/m}^3$

$$P_e = m_p \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{m_v}{\lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{V_z \cdot 10^{-3} \cdot n_{mot} \cdot \rho_v \cdot \eta_d}{2 \cdot 60 \cdot \lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot 10^3 \cdot \eta_c \quad (12)$$

$$P_e = 50,7 \text{ kW} \quad (13)$$

Výpočet pro částečné zatížení

$\lambda = 2,5$, $\eta_d = 0,85$, $\eta_c = 0,35$, $p_b = 1 \text{ bar}$, $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_v = 1,16 \text{ kg/m}^3$

$$P_e = m_p \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{m_v}{\lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{V_z \cdot 10^{-3} \cdot n_{mot} \cdot \rho_v \cdot \eta_d}{2 \cdot 60 \cdot \lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot 10^3 \cdot \eta_c \quad (14)$$

$$P_e = 25,6 \text{ kW} \quad (15)$$

Příklad výpočtu efektivního výkonu motoru pro čtyřdobý přeplňovaný vznětový motor [3]:

$V_z = 1,9 \text{ dm}^3$, $n_{mot} = 4000 \text{ min}^{-1}$, palivo NM, $H_u = 42,5 \text{ MJ/kg}$, $L_{VT} = 14,5 \text{ kg/kg}$

Výpočet pro 100% zatížení

$\lambda = 1,8$, $\eta_d = 0,9$, $\eta_c = 0,38$, $p_b = 1 \text{ bar}$, $p_{pl} = 2,2 \text{ bar}$, $t_{pl} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_{pv} = 2,37 \text{ kg/m}^3$

Kde p_b je atmosférický tlak [bar], p_{pl} plnicí tlak [bar], t_{pl} teplota plnicího vzduchu [$^\circ\text{C}$].

$$P_e = m_p \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{m_v}{\lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot \eta_c = \frac{V_z \cdot 10^{-3} \cdot n_{mot} \cdot \rho_{pv} \cdot \eta_d}{2 \cdot 60 \cdot \lambda \cdot L_{VT}} \cdot H_u \cdot 10^3 \cdot \eta_c \quad (16)$$

$$P_e = 83,6 \text{ kW} \quad (17)$$

2.1.6 Teoretický výpočet a měření hmotnosti nasávaného vzduchu pro různá vozidla

Existuje značné množství měřičů hmotnosti vzduchu pro různé objemy a typy motorů, přičemž každý má svoji specifickou charakteristiku. Tyto měřiče se liší hodnotou maximální měřitelné hmotnosti vzduchu. Hmotnost nasávaného vzduchu motorem, tedy „hltnost“ pro čtyřdobý motor je možné stanovit podle vztahu [4]:

$$M_v = V_z \cdot \eta_{pl} \cdot \frac{n_{mot}}{2} \cdot \rho_v \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{n_{pe}}} \cdot \frac{60}{10^6} \quad (18)$$

kde η_{pl} je účinnost plnění (většinou se dosazuje účinnost plnění 90%, jelikož se spalovací prostor motoru za pracovní cyklus naplní menším objemem vzduchu, než odpovídá zdvihovému objemu motoru. Díky těmto ztrátám se tedy musí dosazovat účinnost plnění menší než 1), p je tlak vzduchu za turbodmychadlem v barech (tlak vzduchu proudícího do spalovacího prostoru), p_0 je tlak vzduchu před turbodmychadlem v barech (tlak vzduchu nasávaného z okolního prostředí), podíl p/p_0 představuje stupeň stlačení nasávaného vzduchu, n_{pe} polytropický exponent (pro vzduch dosazujeme asi 1,25 – platí pro přeplňované motory s mezichladičem stlačeného vzduchu), číslo 60 představuje převod mezi minutami a hodinami a číslo 10^6 představuje převod mezi m^3 a cm^3 [4].

Aby bylo možné testovat vlastnosti snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu, je důležité stanovit rozsah hodnot u těchto snímačů. To bylo provedeno výpočtem dle výše uvedeného vzorce pro různé typy motorů. Pro správný výpočet je nezbytné znát maximální výkon motoru při jmenovitých otáčkách. Tyto hodnoty je možné získat např. z technického průkazu vozidel. Dále je pro jednodušší výpočet uvažován polytropický exponent o hodnotě 1,25 a účinnost plnění pro všechny hodnoty 90%, přičemž pro benzínové motory nelze určit účinnost plnění, a proto je nutné měřit při plně otevřené škrtkové klapce. Hodnotu plnicího tlaku je možné stanovit měřením na konkrétním vozidle. Měření musí být provedeno při třetím rychlostním stupni a plném zatížení. Při jmenovitých

otáčkách motoru je posléze proveden odečet plnicího tlaku. Vypočtené hodnoty hmotnosti nasávaného vzduchu pro různé typy vozidel jsou uvedeny v tabulkách níže:

1. Škoda Superb 3U4, vznětový přeplňovaný motor o objemu 1896 ccm, 4 válce, jmenovitý výkon 77 kW při 4000 ot/min.

Tab. 1. Vypočtené hodnoty pro vozidlo Škoda Superb

| Tlak přeplňování | Vypočtená hmotnost nasávaného vzduchu | | | |
|---------------------|--|--------|---------------------------|--------|
| | volnoběh 882 ot/min | | max. výkon 4000 ot/min | |
| [bar] | [kg/h] | [mg/z] | [kg/h] | [mg/z] |
| 2,3 | 52 | 488 | 464 | 967 |

2. Audi A6 4F, vznětový přeplňovaný motor o objemu 2698 ccm, 6 válců, jmenovitý výkon 132 kW při 3300 ot/min

Tab. 2. Vypočtené hodnoty pro vozidlo Audi A6

| Tlak přeplňování | Vypočtená hmotnost nasávaného vzduchu | | | |
|---------------------|--|--------|---------------------------|--------|
| | volnoběh 819 ot/min | | max. výkon 3300 ot/min | |
| [bar] | [kg/h] | [mg/z] | [kg/h] | [mg/z] |
| 2,3 | 68 | 463 | 545 | 917 |

3. VW Transporter T5, vznětový přeplňovaný motor o objemu 2461ccm, 5 válců, jmenovitý výkon 96 kW při 3500 ot/min

Tab. 3. Vypočtené hodnoty pro vozidlo VW Transporter

| Tlak přeplňování | Vypočtená hmotnost nasávaného vzduchu | | | |
|---------------------|--|--------|---------------------------|--------|
| | volnoběh 798 ot/min | | max. výkon 3500 ot/min | |
| [bar] | [kg/h] | [mg/z] | [kg/h] | [mg/z] |
| 2,1 | 61 | 507 | 490 | 933 |

Při volnoběhu se může stát, že dojde k otevření ventilu pro recirkulaci výfukových plynů. Hmotnost vzduchu, který protéká přes měřič hmotnosti vzduchu, se pak zmenší o množství přisávaných spalin. Při výpočtu hmotnosti nasávaného vzduchu pro volnoběh byl uvažován atmosférický tlak 979,2 mbar.

2.2 Principy vybraných typů snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu

Existuje mnoho fyzikálních principů, na jejichž základě se dá měřit hmotnost nasávaného vzduchu. Používala se např. mechanicky vzdouvací klapka, která byla umístěna v sání motoru. Proudící vzduch pootáčel měřicí klapku, ta byla spojena pomocí hřídele s jezdcem potenciometru, který převáděl úhel natočení klapky na elektrické napětí. V tomto případě se nejednalo o měření hmotnosti nasávaného vzduchu, ale o měření množství vzduchu. Pro určení hmotnosti je potřeba zohlednit teplotu a tlak vzduchu. Mezi další principy měření hmotnosti vzduchu patří např. měření průtoku pomocí ultrazvuku, nebo měření pracující na termickém principu. Snímače na termickém principu se dále dělí podle konstrukce na snímače se žhaveným drátem nebo s vyhřívaným filmem. V současné době jsou nejrozšířenější snímače pracující s vyhřívaným filmem, jejichž základní principy jsou rozebrány níže.

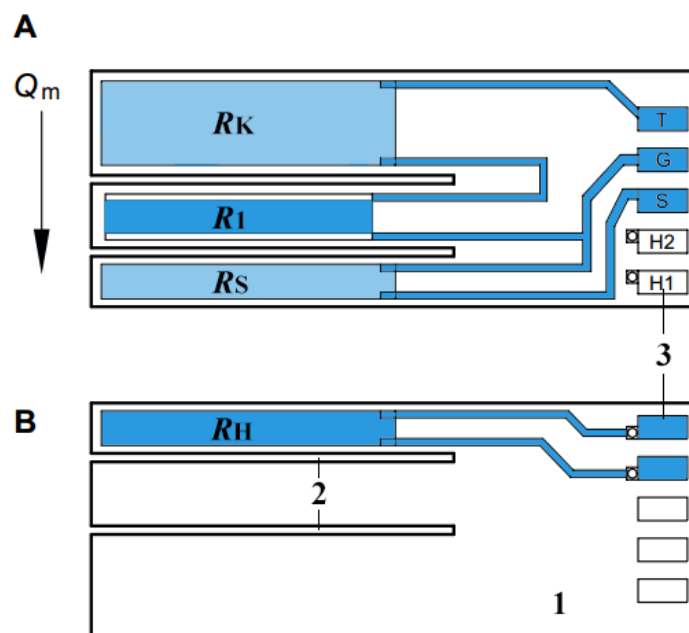
2.2.1 Snímače hmotnosti vzduchu HFM 2

Celý snímač hmotnosti nasávaného vzduchu HFM 2 (Hot film air mass meter) pracující s principem vyhřívaného filmu se skládá z průtokového kanálu neboli tubusu, ve kterém je nasávaný proud vzduchu směřován až k vlastnímu snímači. V závislosti na typu použití je snímač hmotnosti vzduchu zcela integrován do tubusu, nebo je použit pouze vlastní snímač jako samostatný výměnný modul.



Obr. 4 Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu s vyhřívaným filmem typu HFM 2 [5]

Měřicí element spolu s vyhodnocovací elektronikou vytvářejí výstupní napěťový signál, jehož velikost je úměrná hmotnostnímu toku nasávaného vzduchu. Vyhodnocovací elektronika je rovněž součástí měřiče. Měřicí element, představovaný keramickou destičkou, je opatřen tenkými kovovými ploškami a jednou z nich je i elektricky vyhřívaný platinový rezistor R_H . Od tohoto rezistoru se ohřívá plošný měřicí rezistor R_S , který je umístěn přímo proti vyhřívacímu rezistoru na druhé straně tenké keramické destičky. Měřicí rezistor R_S snímá teplotu vyhřívacího prvku R_H . Na destičce jsou umístěny ještě další plošky, které představují rezistor R_K sloužící pro teplotní kompenzaci vzduchu a další rezistor R_1 zapojený s kompenzačním rezistorem do série. Toto sériové zapojení R_K a R_1 spolu s měřicím rezistorem R_S tvoří polovinu měřicího odporového můstku. Druhou polovinu můstku tvoří rezistory R_2 a R_3 , které jsou mimo keramickou destičku. Měřicí můstek je spojen s vyhodnocovacím elektrickým obvodem. [5]



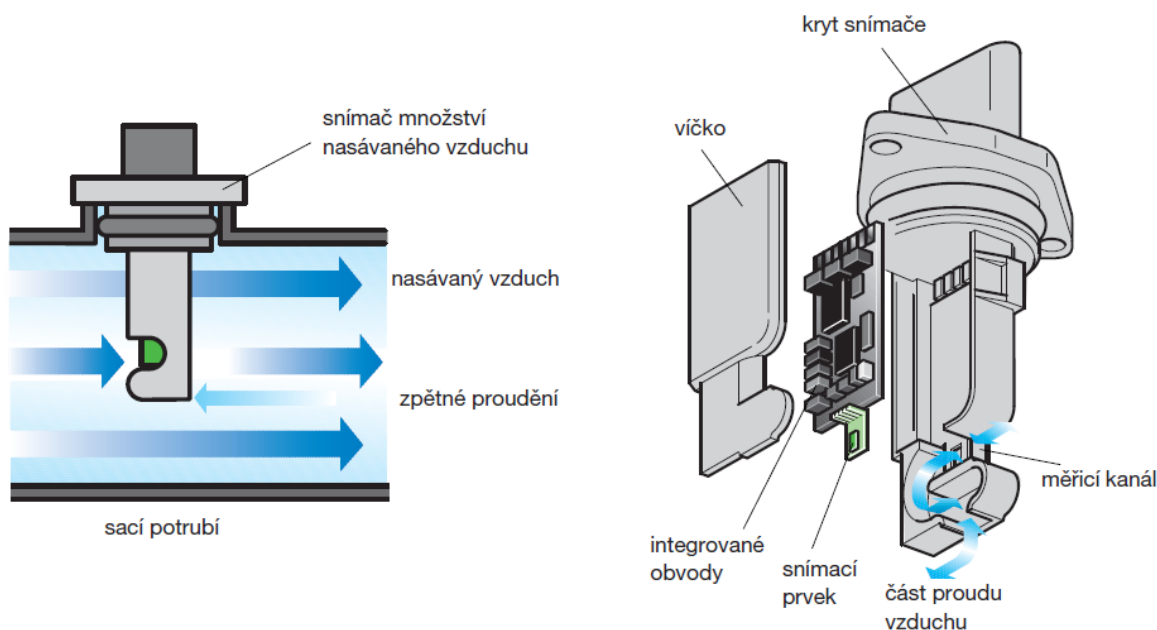
Obr. 5 Snímač s vyhříváním filmem HFM 2 (substrát) [5]

Legenda k obrázku 5: (A) přední strana, (B) zadní strana, (1) keramický substrát, (2) dva prořezy, (3) kontakty, (R_K) snímač pro kompenzaci teploty, (R_H) vyhřívací rezistor, (R_S) snímací rezistor, (R_1) rezistor můstku

Měřicí element je podélně umístěn do proudu vzduchu tak, že obě strany destičky a tudíž i plošné rezistory jsou obtékány nasávaným vzduchem, který tyto rezistory ochlazuje. Vyhřívací rezistor je napájen proudem tak, aby byl vyhříván na teplotu vyšší, než je teplota nasávaného vzduchu. Úkolem regulačního obvodu je pak udržovat konstantní rozdíl teplot vyhřívacího rezistoru a nasávaného vzduchu při libovolném hmotnostním toku vzduchu. Prochází-li měřičem nízký hmotnostní tok vzduchu, jsou plošné rezistory vzduchem jen málo ochlazovány a pro udržení teploty na keramické destičce stačí malý topný proud. Naopak při vysokém hmotnostním toku vzduchu odebírá procházející vzduch značnou dávku tepla z měřicí destičky a pro udržení teploty je tedy třeba pustit do vyhřívacího rezistoru značný proud, tím na výstupu regulačního obvodu vzniká výstupní napěťový signál, jehož velikost je úměrná vyhřívacímu proudu a tedy i hmotnostnímu toku vzduchu. Jak již z principu vyplývá, vyhřívání film je zde tenká vrstvička kovu tvořící vyhřívací rezistor. [5]

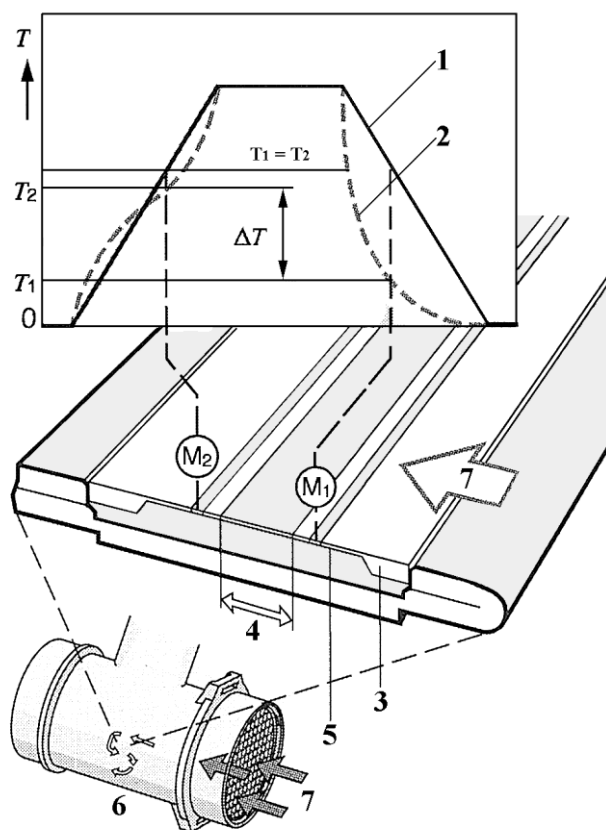
2.2.2 Snímače hmotnosti vzduchu HFM 5

Tento typ snímače již patří mezi modernější, jeho značnou výhodou oproti snímači HFM 2 je to, že dokáže rozlišit směr proudění vzduchu. Mezi další výhody tohoto snímače patří omezení víření kolem snímacího prvku a větší přesnost. Bylo toho dosaženo úpravou konstrukce snímače tak, že se vytvořil speciální kanálek, jehož tvar zajišťuje klidné proudění vzduchu bez víření a rozlišuje mezi prouděním ve směru do motoru a zpětným prouděním vznikajícím vlivem pulzací v sání. Základním principem měření je opět termická metoda, pouze vyhodnocování je již odlišné.



Obr. 6 Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu s vyhřívaným filmem typu HFM 5 [6]

Na obrázku 7 je znázorněn měřicí článek a teplotní profil snímače HFM 5. Na polovodičovém substrátu je napařena vyhřívaná zóna a teplotně závislé rezistory, které představují měřicí body M_1 a M_2 . Tyto měřicí body M_1 a M_2 jsou uspořádány symetricky vůči vyhřívané zóně. Při proudění vzduchu směrem do motoru je měřicí bod M_1 před vyhřívací zónou a měřicí bod M_2 naopak za vyhřívací zónou. Jestliže neproudí žádný vzduch měřicím kanálkem, tak jsou oba měřicí body ohřívány od vyhřívací zóny rovnoměrně a vzniká symetrický teplotní profil. Začne-li proudit vzduch přes měřicí článek do motoru, teplotní profil se mění. V oblasti měřicího bodu M_1 dochází k ochlazení tímto proudícím vzduchem. U druhého měřicího bodu M_2 nejprve dojde také k ochlazení, ale v dalším průběhu proudění se do této oblasti dostává vzduch ohřátý vyhřívanou zónou a měřicí článek M_2 se začne ohřívát. Tím vzniká rozdíl v teplotním profilu snímače, což vede k rozdílu teplot ΔT mezi měřicími body M_1 a M_2 . Teplo předané vzduchu a tím i průběh teplot na měrném článku závisí na hmotnosti vzduchu proudícího okolo článku. Rozdíl teplot je měřítkem pro proud vzduchu. Navíc lze rozlišit i směr proudění a to pouhou záměnou teplotních profilů jednotlivých měřicích bodů M_1 a M_2 . Rozdíl teplot mezi M_1 a M_2 bude mít pak opačné znaménko. Rozdíl odporů v měřicích bodech M_1 a M_2 převádí vyhodnocovací elektronika na analogový signál, který je již přizpůsobený pro řídicí jednotku. Pomocí uložené charakteristiky se převádí naměřené napětí na proud vzduchu v kg/h. Výstupní signál tohoto snímače je tedy analogový a v rozsahu napětí 0 až 5 V. [5]

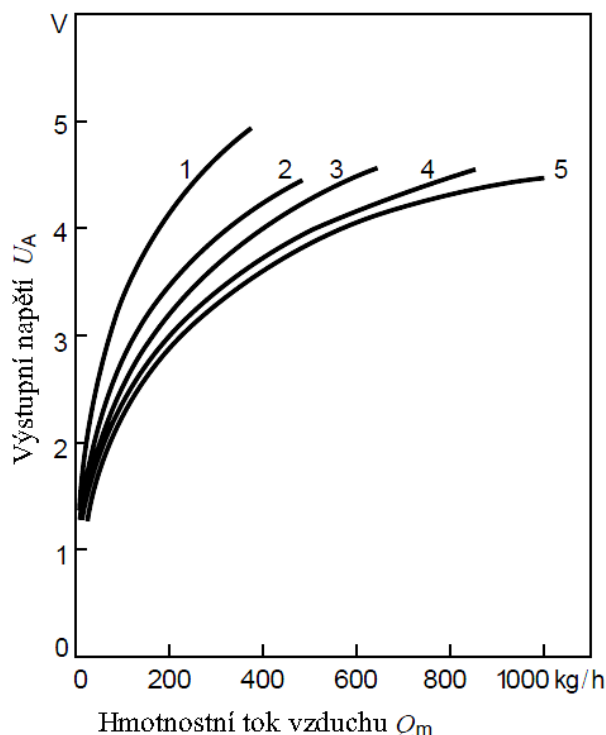


Obr. 7 Teplotní profily na měřicím prvku [5]

Legenda k obrázku 7: (1) teplotní profil bez proudění, (2) teplotní profil s prouděním, (3) měrný článek snímače, (4) vyhřívaná zóna, (5) membrána snímače, (6) měřicí trubka s měřičem hmotnosti vzduchu, (7) proud nasávaného vzduchu, (M_1) měřicí bod, (M_2) měřicí bod, (T_1) hodnoty teploty v měřicích bodech M_1 a M_2 , (T_2) hodnoty teploty v měřicích bodech M_1 a M_2 , (ΔT) rozdíl teploty

Při ověřování správné funkčnosti snímače nastává problém s tím, že sice můžeme změřit jeho výstupní napětí, ale rovněž musíme znát i jeho napěťovou charakteristiku, abychom mohli určit hmotnost nasávaného vzduchu. Jelikož existuje mnoho modelů těchto snímačů pro různé měřené rozsahy, jsou i jejich napěťové charakteristiky odlišné. Příklad takových charakteristik je na obr. 8.

Charakteristika, která je uložena v řídicí jednotce motoru, je navržena tak, aby integrovaný diagnostický blok rozpoznal závady snímače hmotnosti nasávaného vzduchu. Tato charakteristika je rovněž využívána při výpadku snímače. Např. u vozidla Škoda Octavia 1.8 T jsou při výpadku použity náhradní hodnoty tak, aby se to co nejméně projevilo na jízdních vlastnostech vozu. Oproti tomu u dieselového motoru AGR ve vozidle Škoda Octavia 1.9 TDI dochází při výpadku tohoto snímače ke snížení tlaku v turbodmychadle. Pro zajištění chodu motoru v rozsahu částečného zatížení se nastaví konstantní hodnoty a dojde ke snížení výkonu motoru. Pro doplňující vyhodnocení může být ve snímačích hmotnosti vzduchu integrován doplňující snímač teploty, který se nachází na měrném článku za vyhřívanou zónou.

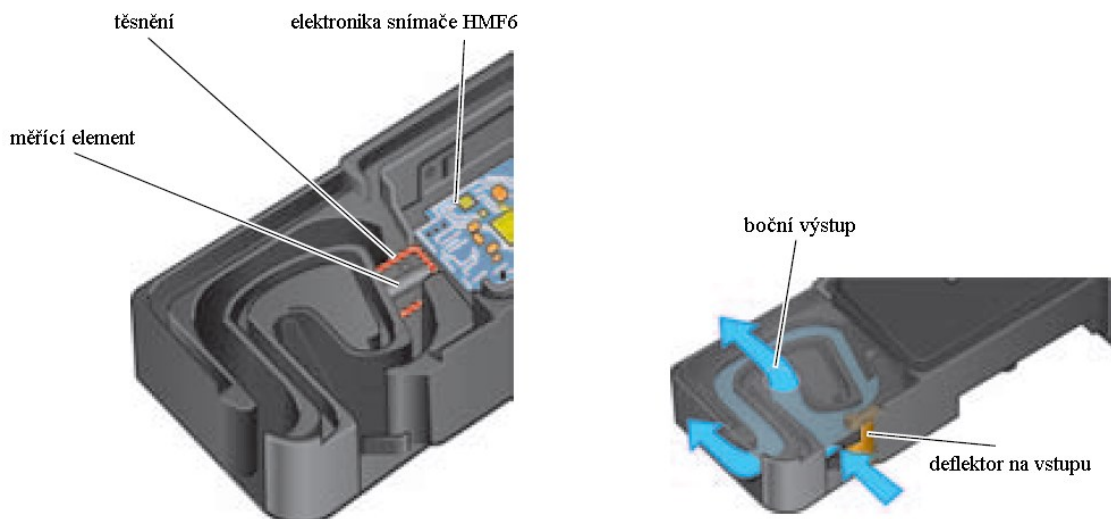


Obr. 8 Výstupní napětí měřiče hmotnosti vzduchu [5]

Legenda k obrázku 8: (1) měřič, který je nejčastěji používán pro maloobjemové motory, např. 1,0 a 1,2 litru, (2) nejpoužívanější pro motory o objemu 1,6 až 2,4 litru, (3) určen pro motory s objemem 2,5 až 3 litrů, (4) a (5) jsou již méně časté a používají se u méně běžných, velkoobjemových motorů.

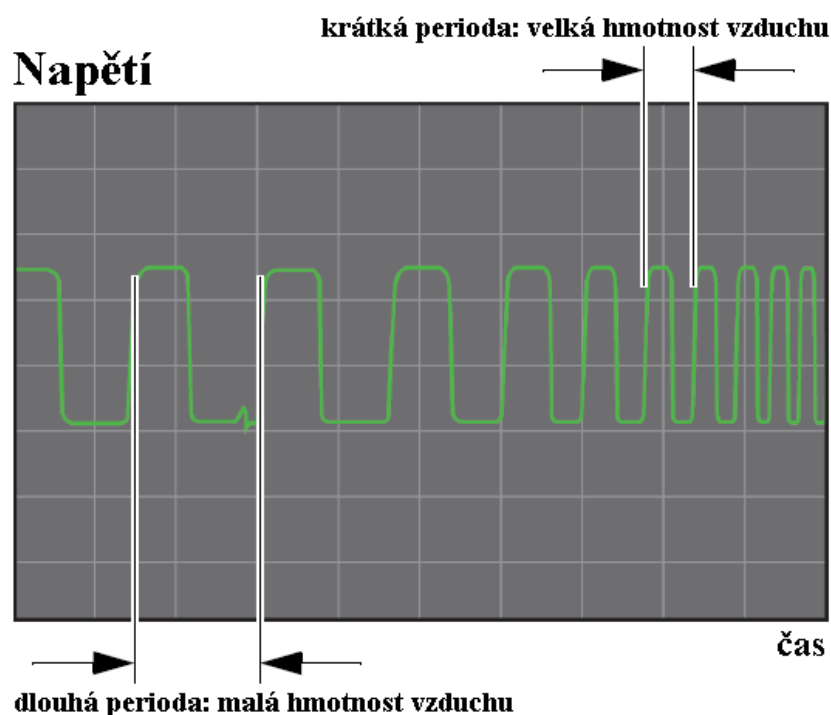
2.2.3 Modernější snímače hmotnosti vzduchu HFM 6

Tyto snímače se liší od předcházejících tím, že jejich výstupní signál již není analogový, ale digitální. Výhodou tohoto řešení je menší náchylnost na vnější rušení. Pro kontrolu je nezbytný osciloskop, nebo multimetr s frekvenčním měřicím rozsahem. Na výstupu snímače se nachází frekvenčně modulovaný obdélníkový impulz, jehož perioda se mění v závislosti na množství vzduchu tak, že při větším množství vzduchu se perioda obdélníkového impulzu snižuje. Řídící jednotka motoru rozpoznává hmotnost nasávaného vzduchu z periody výstupního signálu snímače. Amplituda tohoto impulzu je cca 12 V. Princip snímání hmotnosti vzduchu je stejný jako u snímačů typu HFM 5. Další velkou výhodou nového snímače HFM 6 oproti staršímu provedení je zdokonalená konstrukce měřicího kanálu včetně použití lepších materiálů pro konstrukci měřicího elementu a těsnění.



Obr. 9 Konstrukce snímače hmotnosti vzduchu HFM 6 [7]

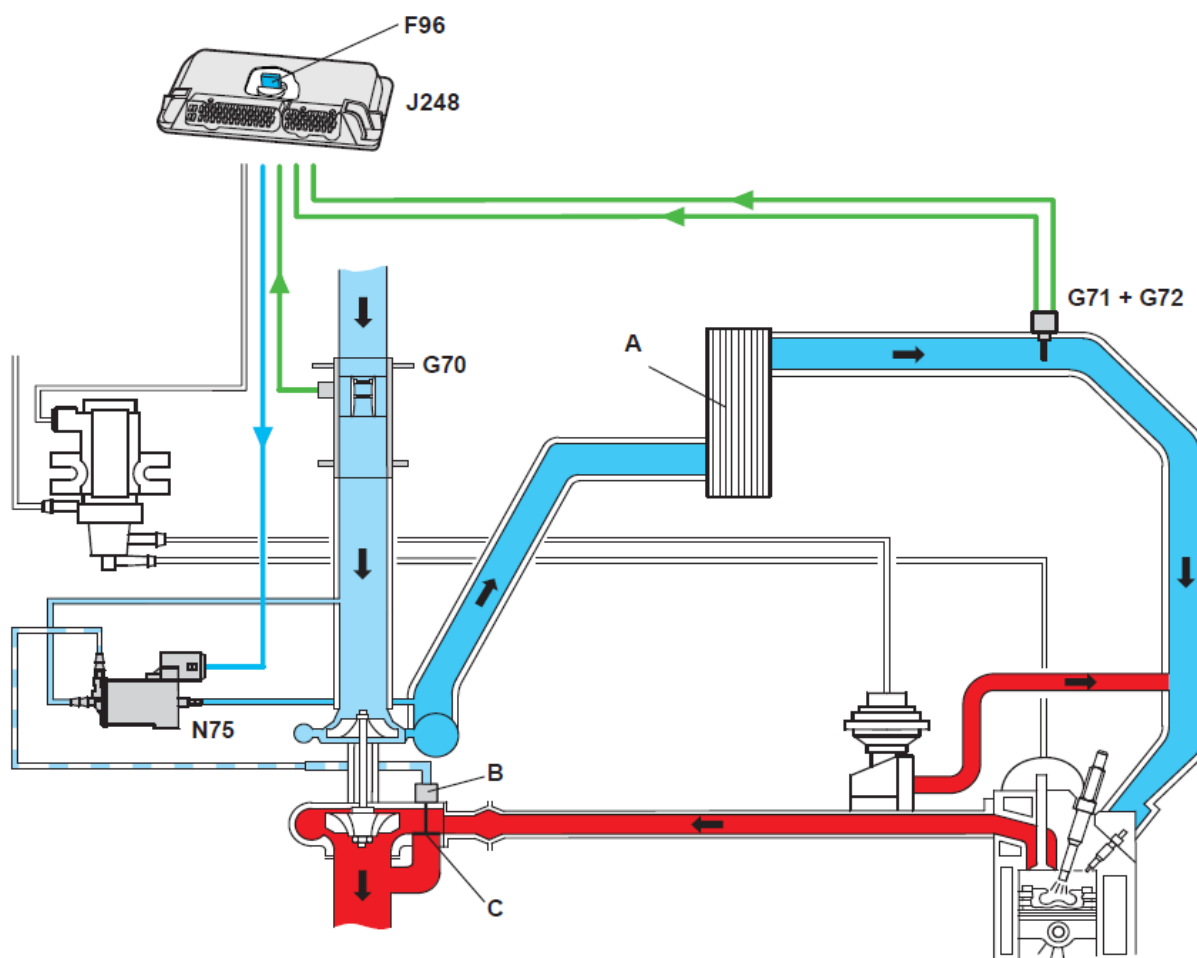
Tento nový design měřicího kanálu podstatně snižuje riziko znečištění měřicího elementu. Proud vzduchu, který je produkován speciálním deflektorem na vstupu měřicího kanálku, dosahuje vysokého stupně oddělení nečistot a částic vody, jež se tak vůbec nedostávají až k měřicímu elementu. Velká část proudícího vzduchu spolu s nečistotami je tak díky této konstrukci odkloněna do bočního odvodového kanálku a dostává se ven ze snímače. Tento nový systém zvyšuje životnost a zajišťuje, že systém řízení motoru bude mít vždy stálou dodávku vzduchu.



Obr. 10 Výstupní signál snímače HFM 6 [7]

2.3 Principy vybraných typů snímačů tlaku

V dnešních vozidlech je velmi pestrá paleta různých snímačů tlaku, monitorující tlak např. vzduchového odpružení, v pneumatikách, v hydraulickém zásobníku u ABS a servořízení, ve spalovacím prostoru pro rozpoznání vynechávání zapalování a klepání, modulační tlak u automatických převodovek, brzdící tlak a různé jiné. V této diplomové práci se zajímám především o snímače barometrického tlaku (v servisní literatuře se též uvádí snímač nadmořské výšky) a snímače tlaku v sacím potrubí, které v tomto potrubí měří absolutní tlak. Na obrázku 11 je uvedeno, kde v motoru se tyto snímače nachází.



Obr. 11 Přehled motoru 1.9 TDI AGR 66kW [8]

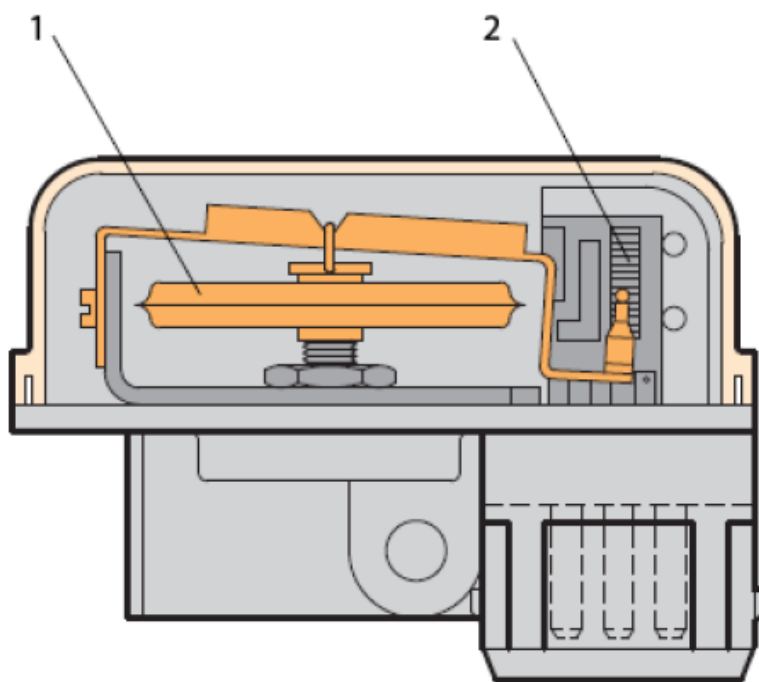
Legenda k obrázku 11: (F96) snímač barometrického tlaku, (J248) řídicí jednotka motoru, (G70) snímač hmotnosti vzduchu, (G71) snímač tlaku nasávaného vzduchu, (G72) snímač teploty nasávaného vzduchu, (N75) elektromagnetický ventil omezování plnicího tlaku vzduchu, (A) mezichladič vzduchu, (B) tlaková nádoba, (C) ventil pro regulaci plnicího tlaku vzduchu.

2.3.1 Snímače barometrického tlaku

Snímač je většinou integrován přímo do řídicí jednotky motoru, naleznou se ale i vy jímky, především u starších vozů, kdy tomu tak není. Např. u motoru 1.8 l Turbo ve voze Škoda Octavia 1 je tento snímač umístěn v motorovém prostoru na příčné stěně. Tento snímač podává řídicí jednotce informaci o změně velikosti atmosférického tlaku vzduchu v závislosti na nadmořské výšce. Signál se využívá k regulaci plnicího tlaku, protože ve výškách nad 1000 m požadovaná hodnota plnicího tlaku s přibývajícím výškou plynule klesá a docházelo by tak k přetěžování turbodmychadla. Při výpadku se použije taková náhradní hodnota, aby došlo ke snížení plnicího tlaku, přičemž se jedná o bezpečnostní opatření zajišťující nepřekročení maximálních otáček turbodmychadla. [6]

K měření se využívá principu barometru (obr. 12) v případě neintegrovaného provedení snímače. Pro integrované provedení v řídicí jednotce se používají tzv. membránové snímače, jejichž membrána je působením tlaku vychylována (obr. 13).

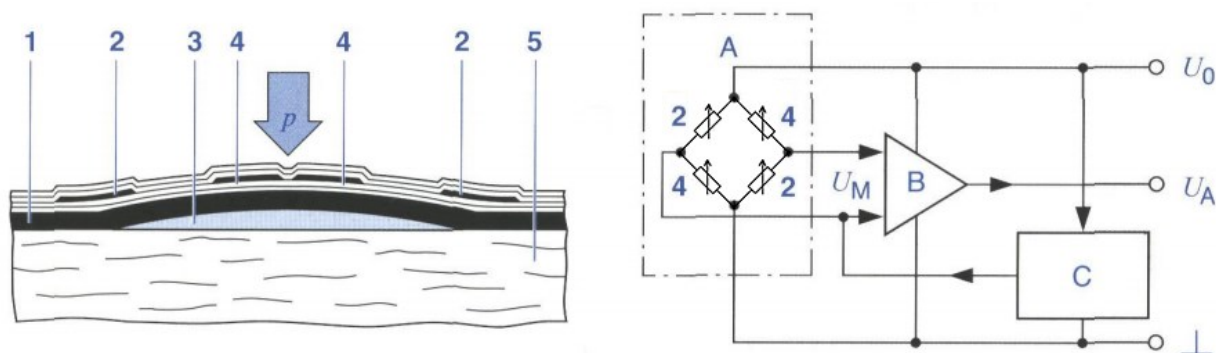
Barometrické snímače tlaku snímají atmosférický tlak barometrem, přičemž kryt barometru je propojen s ramínkem jezdce potenciometru. Při změně tlaku dochází i ke změně polohy jezdce potenciometru a tedy i ke změně odporu. Výsledný signál snímače je přijímán řídicí jednotkou motoru.



Obr. 12 Princip barometrického neintegrovaného snímače [6]

Legenda k obrázku 12: (1) kryt barometru, (2) odporová dráha.

Tlustovrstvé snímače tlaku se používají jako snímače tlaku v sacím potrubí, nebo jako snímače okolního tlaku. Samotný snímač je rozdělen na měřicí buňku a prostor pro vyhodnocovací elektroniku. Obě tyto části jsou umístěny na společném keramickém substrátu. Měřicí buňka se skládá z tlustovrstvé membrány, pod kterou je umístěna referenční tlaková komůrka se jmenovitým tlakem 0,1 bar. Vnější tlak, působící na membránu, ji různě silně vychyluje. Jelikož jsou v oblasti membrány integrovány čtyři roztažné rezistory v můstkovém zapojení, které mění svou vodivost podle mechanického napětí, dochází ke změně vyvážení tohoto můstku, jehož napětí je měřítkem pro měřený tlak. Vyhodnocovací elektronika provádí linearizaci, kompenzaci a zesílení napětí můstku. Tento signál je pak přiváděn do řídicí jednotky motoru.



Obr. 13 Princip tlustovrstvého snímače tlaku a jeho zapojení [9]

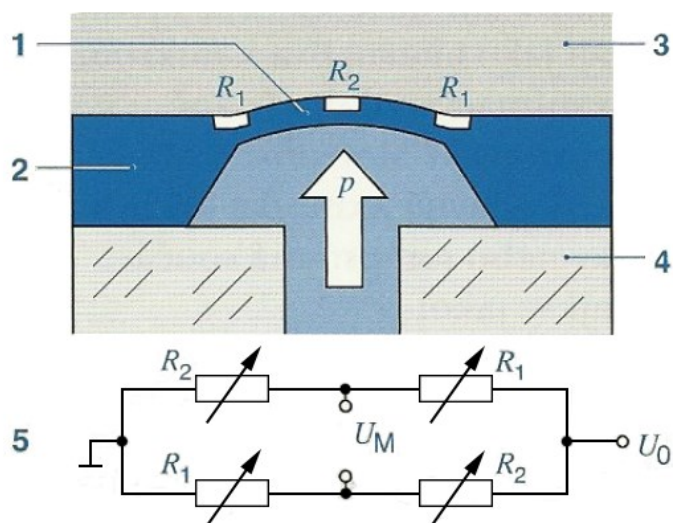
Legenda k obrázku 13: (1) tlustovrstvá membrána, (2) pasivní referenční rezistor, (3) referenční tlaková komůrka, (4) aktivní rezistor, (5) keramický substrát, (p) měrný tlak, (A) měřicí buňka, (B) zesilovač, (C) teplotní kompenzační obvod, (U_0) napájecí napětí, (U_M) měřené napětí, (U_A) výstupní napětí.

2.3.2 Snímače tlaku nasávaného vzduchu

Tento snímač se nachází v potrubí za chladičem nasávaného vzduchu a většinou je kombinovaný i se snímačem teploty nasávaného vzduchu. Přesné umístění tohoto snímače ve vozidle je uvedeno na obr. 11. Tento mikromechanický snímač měří absolutní tlak v sacím potrubí a porovnává jej s referenčním vakuem, ne s okolním tlakem. To umožňuje regulovat tlak přepřínování dle požadavků motoru a dále i přesný výpočet hmotnosti nasávaného vzduchu. Pro určení tlaku má řídicí jednotka motoru v sobě integrovanou tabulku tlaků odpovídající velikosti napětí přivedeného ze snímače, tedy pro správné určení stačí porovnat naměřenou hodnotu napětí s hodnotou napětí v tabulce. Při výpadku tohoto snímače využije jednotka předem stanovenou pevnou hodnotu plnicího tlaku, dochází k poklesu výkonu motoru a růstu emisí.

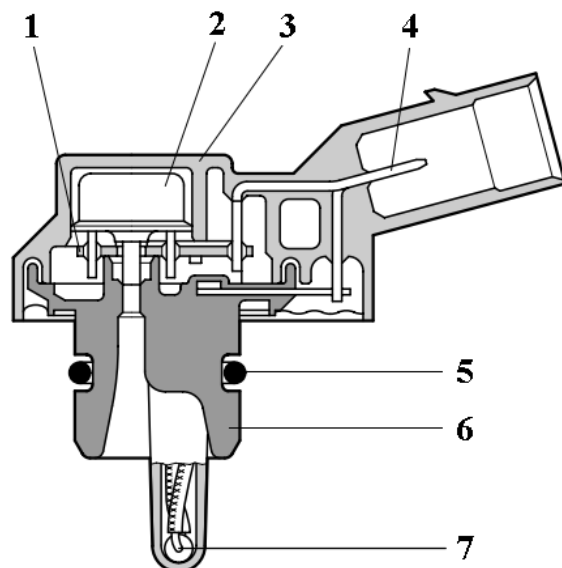
Mikromechanický snímač tlaku obsahuje křemíkový čip s vyleptanou tenkou membránou. Na ní jsou rozmístěny čtyři elastické rezistory, které se změnou mechanického napětí mění svůj odpor. Při měření tlaku se membrána měřicí buňky různě prohýbá v závislosti na měřeném tlaku, čímž vyvolává změnu mechanického napětí a tím pádem i změnu odporu na měřicích rezistorech. Tyto měřicí rezistory jsou zapojeny ve Wheatstonově můstku a rozmístěny tak, aby při deformování membrány u dvou měřicích rezistorů jejich odpor rostl a zbylých dvou klesal. Při změně odporu se tedy mění i poměr elektrických napětí a tedy i měřené napětí U_m . Toto napětí je měřítkem pro tlak na membráně. Jelikož je strana membrány, na kterou nepůsobí tlak, vystavena referenčnímu vakuu, snímač měří absolutní tlak.

Pro zesílení výstupního napětí snímače, kompenzaci vlivu teploty a pro linearizování tlakové charakteristiky, je využívána elektronika, která je ve snímači integrována. Výstupní napětí se mění v rozsahu od 0 do 5 V. [9]



Obr. 14 Měřicí buňka tlaku s referenčním vakuem na straně struktury [9]

Legenda k obrázku 14: (1) membrána, (2) křemíkový čip, (3) referenční vakuum, (4) skleněná patice, (5) můstkové zapojení rezistorů, (p) měřený tlak, (U_0) napájecí napětí, (U_M) měřené napětí, (R_1) roztažený rezistor (stlačovaný), (R_2) roztažený rezistor (protahovaný).



Obr. 15 Mikromechanický snímač tlaku s referenčním vakuem na straně struktury [9]

Legenda k obrázku 15: (1) PCB, (2) měřicí buňka, (3) víko pouzdra, (4) konektor, (5) těsnící kroužky, (6) spodní část pouzdra, (7) snímač teploty NTC.

Mezi další mikromechanické snímače tlaku patří snímače s referenčním vakuem v dutině. Způsob činnosti a tím i zpracovávání signálu a charakteristika je shodná s předchozím snímačem. Jediný rozdíl spočívá v tom, že se membrána měřicí buňky deformuje opačným směrem.

3. PRAKTICKÁ REALIZACE A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

3.1 Základní požadované vlastnosti stanoviště pro měření snímačů hmotnosti a tlaku nasávaného vzduchu

3.1.1 Regulace množství protékajícího vzduchu

Regulace množství protékajícího vzduchu přes snímače na stálou hodnotu je možná pouze s připojenou redukcí s ventilátorem. Dále je možné generovat průtok vzduchu přes snímače turbodmychadlem, a to připojením redukce, která napojí snímače na dmychadlovou část turbodmychadla. V tomto případě není dostupná elektronická regulace.

Aby bylo možné měřit snímače v co největším rozsahu, byl použit ventilátor DV 6318 /2TDH4P s maximálním průtokem 1050 m³/h. Napájení ventilátoru je stejnosměrné se jmenovitým napájecím napětím 48V. Rozsah napájecího napětí udávaný výrobcem je od 36 V do 72 V. Maximální výkon ventilátoru je 300W. Tento ventilátor je vybaven samostatným vstupním vodičem pro přivedení PWM signálu a je ho možné řídit od 1000 ot/min do 6000 ot/min, což jsou maximální otáčky udávané výrobcem.

PWM signál pro řízení ventilátoru je vytvářen pomocí mikroprocesoru PIC18F4525-I/P, který umožňuje nastavit jeho frekvenci od 2,44 kHz s rozlišením 10b do 416,67 kHz s rozlišením 6,58b. Pro náš signál byla zvolena frekvence 39,06 kHz s rozlišením 10b.

3.1.2 Regulace tlaku v potrubí se snímačem tlaku

Aby byla tato podmínka splněna, bylo laboratorní stanoviště doplněno o škrticí klapku, která je připevněna pomocí spojovací hadice k výstupu dmychadlové části turbodmychadla. Pro generování dostatečného tlaku je potřeba roztáčet turbodmychadlo přivedením dostatečného tlaku vzduchu do turbínové části turbodmychadla.

3.1.3 Požadavek na mazání použitého turbodmychadla

Konstrukce turbodmychadla je uzpůsobena požadavku na velmi vysoké otáčky jeho rotujících částí. Dle konstrukce se tyto otáčky mohou lišit od 10 000 do 300 000 ot/min. Vzhledem k tak vysokým otáčkám je nezbytné při konstrukci turbodmychadla použít fluidní ložiska, ve kterých jsou pohybující se části odděleny a chlazeny za pomoci tenké vrstvy oleje. Olej je obvykle přiváděn přímo z mazací soustavy automobilu. Jelikož použité turbodmychadlo není v tomto případě osazeno přímo ve vozidle, je nutné zajistit dodávku oleje z jiného zdroje.

Dodávka oleje je tedy zajištěna pomocí tlakové nádoby, která je součástí laboratorního stanoviště. Tato nádoba nahrazuje mazací soustavu automobilu a je připojena skrze hadice přímo na přívod a odvod oleje z turbodmychadla. Po naplnění olejem je možné nádobu natlakovat až na 3 bary, a tím

zajistit, aby olej zůstal přímo v turbodmychadle. Do budoucna je možné rozšířit toto řešení o olejové čerpadlo, které by bylo pro tyto účely vhodnější použít.

3.1.4 Snadná výměna snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu a snímačů tlaku

Při návrhu stanoviště byla velmi velká pozornost věnována možnosti snadné výměny použitých snímačů. Snímače hmotnosti nasávaného vzduchu jsou propojeny hadicemi a k jejich pevnému zajištění jsou použity stahovací kovové pásky. S jejich pomocí je možné rovněž velmi snadno tyto snímače měnit i s potrubní částí. Pro snímače tlaku byla vyrobena speciální redukce s hrdlem, na které je možné přišroubovat více druhů přírub. Jelikož existuje velké spektrum snímačů tlaku a téměř každý má jiný způsob uchycení do potrubí, bylo nutné zkonstruovat univerzální systém uchycení snímačů s různou konstrukcí. Do budoucna je možné vyrobit i další příruby pro nové druhy snímačů.

3.1.5 Regulace teploty vzduchu

Jelikož by měly být snímače hmotnosti vzduchu teplotně nezávislé, bylo potřeba tuto schopnost ověřit, a proto byla do systému zakomponována odporová topná spirála o výkonu 1200 W. Ta se nachází hned za boxem se vzduchovým filtrem. Aby bylo možné teplotu regulovat, je za touto spirálou umístěno teplotní čidlo. O regulaci teploty se stará mikroprocesor. Spirála je napájena ze síťového napětí 230 V a její spínání je zajištěno pomocí triaku. Kvůli minimalizaci spínacích ztrát je triaku předřazen obvod, který zajišťuje spínání v nule.

3.1.6 Snadná manipulace s celým stanovištěm

Vzhledem k tomu, že se stanoviště skládá z velkého počtu částí, z nichž některé jsou velmi těžké (např. turbodmychadlo), bylo potřeba pro celé stanoviště vyvinout a vyrobit mechanický pojízdný rám. Při konstrukci tohoto rámu byl kladen velký důraz na možnost snadné výměny kteréhokoliv komponentu stanoviště pro případ mechanického poškození v průběhu životnosti jednotlivých dílů. Turbodmychadlo, vzduchový box, škrticí klapka a olejová nádoba jsou ke stanovišti přišroubovány. Zbýlé díly jsou propojeny pomocí hadic a redukcí a pevně uchyceny ocelovými stahovacími páskami.

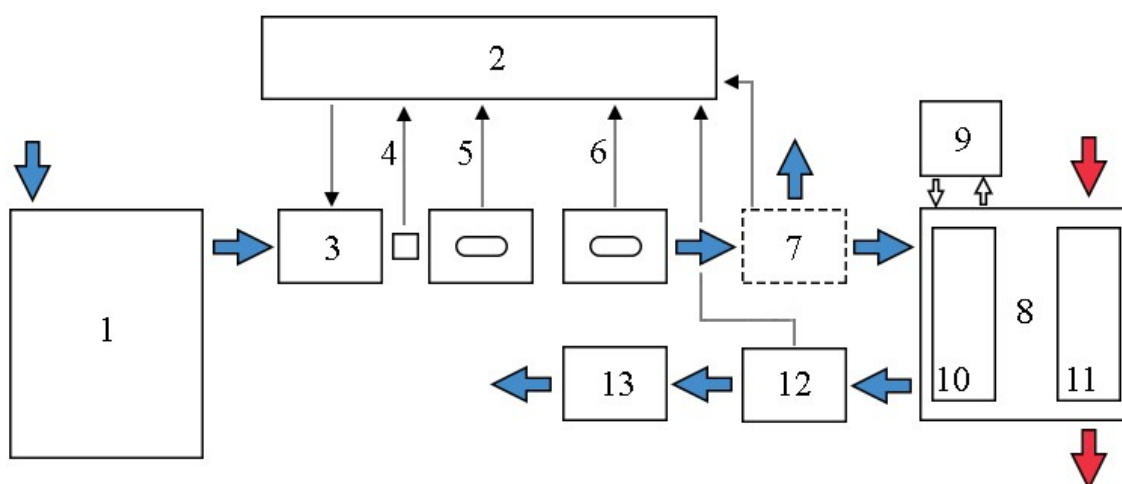
3.2 Mechanická konstrukce

Přehledové schéma mechanické konstrukce stanoviště je vyobrazeno blokově na obr. 16. Na začátku celé soustavy je box se vzduchovým filtrem. Ten je zde umístěn proto, aby bylo zabráněno nasávání nečistot do turbodmychadla, protože tyto nečistoty by ho mohly zničit. Vzduchový box je dále propojen s tepelným zdrojem, ve kterém se nasávaný vzduch ohřívá na požadovanou teplotu. Za tepelným zdrojem je umístěno teplotní čidlo pro možnost regulace teploty. Dál již ohřátý vzduch proudí přes oba snímače hmotnosti vzduchu směrem ke zdroji sání. Zdroj sání představuje buď turbodmychadlo, nebo ventilátor, podle toho, která redukce je právě zapojena. Není tedy nutné kvůli měření snímačů hmotnosti vzduchu roztáčet samotné turbodmychadlo, jež by bylo zároveň obtížné

řídit skrze řídicí jednotku. Pro tento účel je mnohem vhodnější používat přiloženou redukci s vysoce výkonným ventilátorem.

Pro měření snímačů tlaku je nutné použít redukci pro zapojení turbodmychadla. Vzduch tedy dále proudí přes dmychadlovou část turbodmychadla. To je schopné zvýšit tlak na výstupu dmychadlové části až o cca 1 bar. Dále vzduch proudí přes redukci pro připojení různých druhů snímačů tlaku až ke škrticí klapce, která jej vypouští ven ze stanoviště. Pomocí škrticí klapky je možné dosáhnout dalšího zvýšení tlaku vzduchu.

K turbodmychadlu je připojena skrze hadice olejová nádoba přivádějící olej k ložiskům turbodmychadla. Při provozu turbodmychadla je nezbytné, aby tato nádoba byla naplněná olejem a natlakovaná. Pokud by nebylo zajištěno dostatečné mazání, turbodmychadlo by se mohlo nenávratně poškodit.



Obr. 16 Blokové schéma laboratorního stanoviště

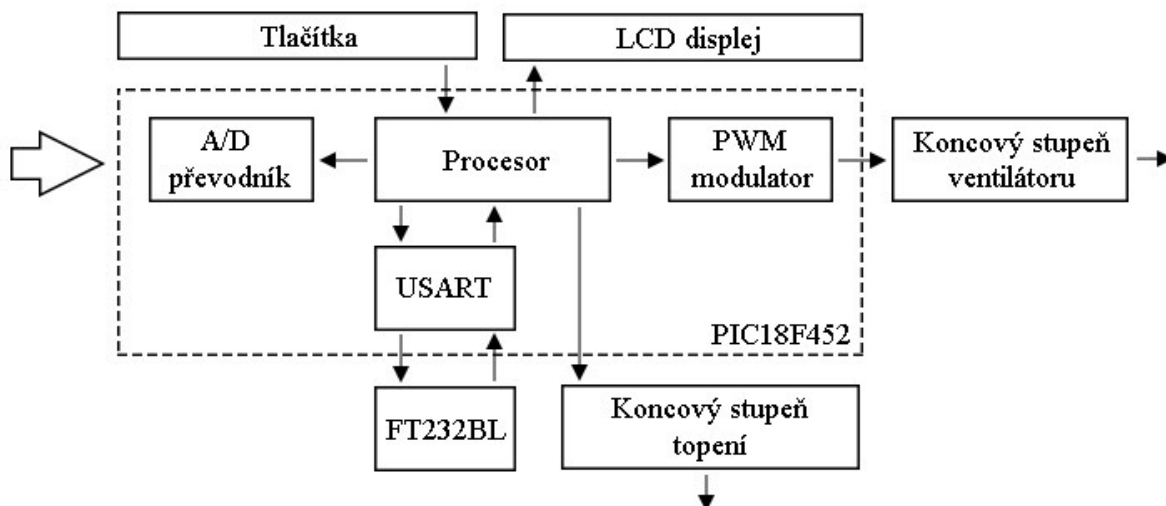
Legenda k obrázku 16: (1) box se vzduchovým filtrem, (2) řídicí a měřící elektronika stanoviště, (3) tepelný zdroj, (4) snímač teploty, (5) referenční snímač hmotnosti nasávaného vzduchu, (6) testovaný snímač hmotnosti nasávaného vzduchu, (7) redukce s ventilátorem, nebo redukce pro propojení zapojení turbodmychadla, (8) turbodmychadlo, (9) olejová nádoba zásobující turbodmychadlo olejem, (10) dmychadlová část turbodmychadla, (11) turbínová část turbodmychadla, (12) redukce pro připojení různých druhů snímačů tlaku, (13) škrticí klapka



Obr. 17 Laboratorního stanoviště – reálná fotografie

3.3 Koncepce elektroniky měřicího stanoviště

Kompletní elektronika stanoviště byla zhotovena na celkem pěti deskách plošných spojů. Základní deska je vyrobena jako dvouvrstvá. Tato deska obsahuje srdce celého stanoviště, a to mikrokontrolér PIC18F4525 v provedení DIP40. Dále je na desce umístěn převodník FT232BL v provedení SMD, který zajišťuje komunikace s PC skrze USB port. Mezi další části stanoviště patří dvouvrstvá deska analogových vstupů s generátorem referenčního signálu pro A/D převodník a dvouvrstvá deska výkonových výstupů (PWM + triak). Zbývající dvě desky plošného spoje jsou již jednovrstvé. Jedná se o desku zdroje a desku s tlačítky. Blokové schéma elektroniky měřicího stanoviště je na obr. 18.



Obr. 18 Blokové schéma elektroniky měřicího stanoviště

3.3.1 Základní deska a popis použitého mikrokontroléru a jeho periférií

Jak již bylo zmíněno výše, je základní deska vyrobena jako oboustranná. Na spodní straně základní desky je umístěn mikrokontrolér PIC18F4525 s pouzdrům DIP40 spolu se všemi potřebnými vstupy či výstupy. Ty jsou vyvedené ve formě konektorů. Na vrchní straně se nachází dva integrované obvody ve formě pro povrchovou montáž SMD. Jedná se o převodník FT232BL, který se stará o transformaci signálu z USART na USB a opačně a k němu připojenou paměť EEPROM FM93C66M. Základní deska je napájena napětím 5 V. Rozměry desky jsou 130x100 mm.

Mikrokontrolér PIC18F4525

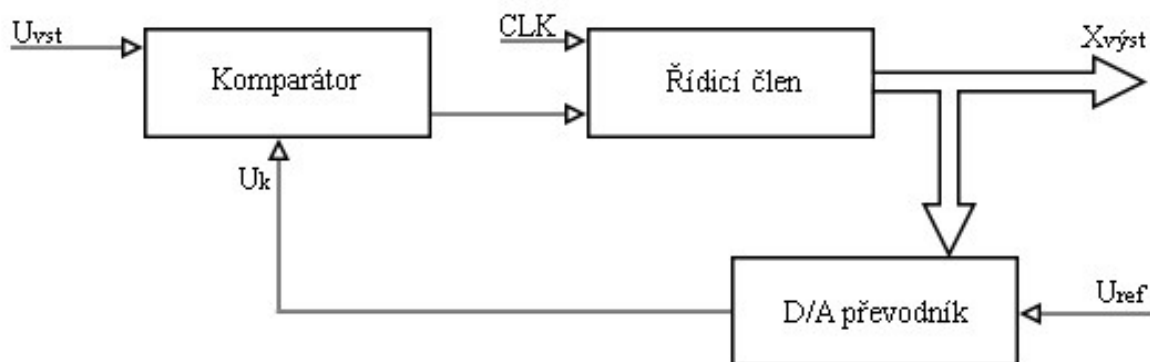
Použitý mikrokontrolér PIC18F4525 je 8bitový a pracuje na frekvenci 40 MHz. Rozsah napájecího napětí pro procesor je stanoven výrobcem od 4,2 do 5,5 V. Přehled základních vlastností procesoru je uveden níže formou odrážek [10]:

- velká variabilita zdrojů hodin (krystal, vnější nebo vnitřní RC článek, vnější zdroj),
- dvě úrovně priority zdrojů přerušení,
- hlídací obvod WDT,
- ladění a programování přímo v systému (ICD, ICSP),
- jednocyklová hardwarová násobička 8 x 8,
- proud výstupních vývodů až 25 mA,
- 3 vnější vstupy přerušení,
- Timer0 – 8/16bitový čítač/časovač s 8bitovou předděličkou,
- Timer1 – 16bitový čítač/časovač,
- Timer2 – 8bitový čítač/časovač s 8bitovým registrem periody (časovou základnou pro PWM),
- Timer3 – 16bitový čítač/časovač,
- 10bitový A/D převodník,
- sériový kanál USART – univerzální synchronní/asynchronní sériový přijímač/vysílač zajišťující snadnou sériovou komunikaci mikrokontrolerů s vnějším okolím,

- 2 moduly Capture/Compare/PWM (CCP). Jedná se o jednotku, která poskytuje funkci záchytného registru (Capture), výstupního komparátoru (Compare) nebo PWM.
- modul sériové komunikace MSSP (podpora SPI sběrnice nebo I2C sběrnice). SPI je sériová sběrnice, která umožňuje snadné připojení sériově komunikujících periferních obvodů. I2C je dvou vodičová sériová sběrnice pro komunikaci s periferními obvody (hodiny a datový signál).

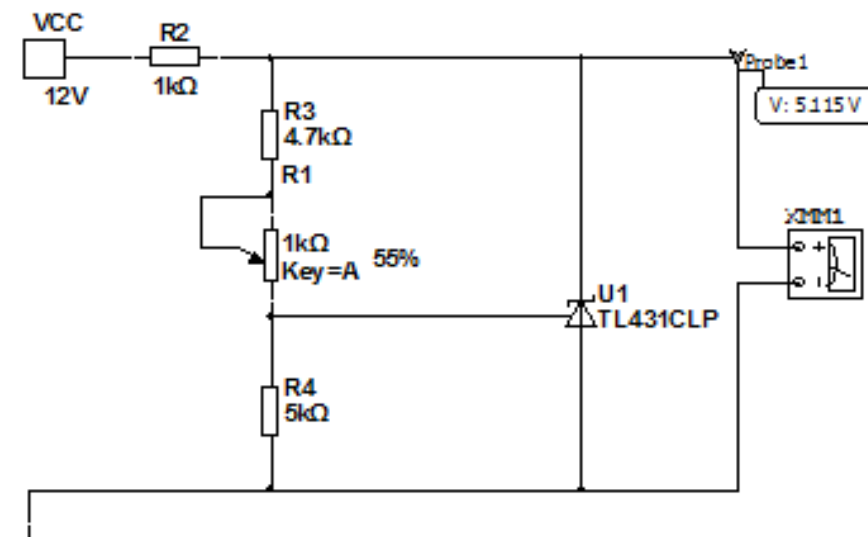
Periférie mikrokontroléru – A/D převodník

Modul analogově/digitálního převodníku obsahuje 8 kanálů, které se pomocí analogového multiplexoru převádějí na samotný převodník. Ten provádí převod vstupního analogového signálu na odpovídající 10bitové číslo. Jedná se tedy o 10bitový převodník. Vzhledem k tomuto principu není tedy možné změřit analogové veličiny na všech kanálech současně v jeden čas. Vzhledem k dynamice námi použitého systému to ale stačí. Pro ovládání A/D převodníku se používají 4 registry. Převodník pracuje na kompenzačním principu s postupnou aproximací. Tato metoda vychází z iterační metody půlení intervalů. Řídicí člen je vlastně registr postupných aproximací. Tento člen nastavuje na začátku převodu nejvyšší bit na „1“ a ostatní na „0“, a tak vytvoří na výstupu D/A převodníku polovinu maximálního napětí. Následně se v komparátoru rozhodne, do které poloviny intervalu náleží převáděný signál a podle toho je pak nejvyšší bit nulován nebo nechán na současně nastavené hodnotě a nastavuje se druhý nejvyšší bit. Tento algoritmus se stále opakuje a je ukončen při rovnosti napětí komparačního a napětí vstupního. Princip tohoto typu převodníku je blokově znázorněn na Obr. 19.



Obr. 19 Principiální blokové schéma kompenzačního A/D převodníku s postupnou aproximací

Pro A/D převodník je důležité přivádět stabilní kladné i záporné referenční napětí. Toto napětí je získáváno pomocí obvodu TL431BL. Výstupní napětí tohoto obvodu je možné nastavit pomocí rezistorů v rozsahu 2,5 V až 36 V. Příčný proud 1 až 100 mA zajišťuje spolehlivou stabilizaci výstupního napětí. Tento paralelní napěťový zdroj dodává pouze kladné referenční napětí, záporné referenční napětí je získáváno odvozením od signálové země procesoru, přičemž je ušetřen jeden vstup do procesoru. Zapojení obvodu je provedeno dle datasheetu výrobce obvodu. Pro přesné nastavení zde slouží odporový trimr. Schéma obvodu je na obr. 20.



Obr. 20 Přesná napěťová reference pro A/D převodník pomocí obvodu TL431CLP (výstup ze simulačního programu Multisim) [12]

Hodnota referenčního napětí 5,115V je zvolena s ohledem na použitý A/D převodník. 10bitový A/D převodník má 2^{10} úrovní. Dostupný počet úrovní je tedy 1024, jelikož je jedna úroveň rezervována pro chybu konverze. Ve skutečnosti je možné použít 1023 úrovní. Pro získání rozlišení 5 mV na jeden bit bylo třeba vynásobit počet úrovní A/D převodníku (1023) číslem 5. Získaná hodnota napětí je 5115 mV.

Periférie mikrokontroléru – PWM

Mikrokontrolér je vybaven dvěma Capture/Compare /PWM (dále jen CCP) jednotkami. Obě jednotky obsahují 16bitový registr, který může pracovat buď jako 16bitový záchytný registr (capture), 16bitový porovnávací registr (compare), nebo jako PWM registr.

Pro nastavení jednotky CCP1 do režimu PWM je potřeba nastavit periodu PWM zápisem hodnoty do registru PR2, nastavit dobu trvání aktivní fáze zápisem hodnoty do CCPR1L:DC1B1:DC1B0, nastavit vývod CCP1 jako výstupní vynulováním bitu 2 registru TRISC, nastavit předděličku pro jednotku Timer2 zápisem do registru T2CON a nakonec nakonfigurovat jednotku CCP1 do PWM režimu.

V PWM režimu produkuje CCP1 PWM výstup s rozlišením až 10 bitů. Rozlišení v šířce 10 bitů je zajištěno tak, že 8bitový registr CCPR1L je spojen s bity DC1B1:DC1B0 z registru CCP1CON. Dále je 8bitový registr doplněn dalšími dvěma vnitřními klopnými obvody nebo dvěma bity předděličky. Perioda signálu PWM je určena hodnotou v registru PR2. Tato hodnota je dle výrobce 255 pro maximální rozlišení 10 bitů. Periodu PWM signálu je možné vypočítat dle vzorce 19.

$$T_{PWM} = (PR2 + 1) \cdot 4 \cdot T_{OSC} \quad (19)$$

Při dosazení tedy dostáváme:

$$T_{PWM} = (255 + 1) \cdot 4 \cdot 25 \cdot 10^{-9} \quad (20)$$

$$T_{PWM} = 25,6 \text{ us} \quad (21)$$

Kmitočet tedy je:

$$f_{PWM} = \frac{1}{T_{PWM}} \quad (22)$$

$$f_{PWM} = 39,062 \text{ kHz} \quad (23)$$

Maximální výstupní frekvence PWM je při 10bitovém rozlišení 39,062 kHz.

V okamžiku hodinového cyklu následujícího po shodě hodnoty časovače s hodnotou PR bude nastavena hodnota na vývodu CCP1 do log. 1, hodnota v časovači bude vynulována a hodnota střídý bude přepsána z CCP1L do CCP1H. Překlopení do log. 0 nastává při shodě hodnoty časovače s hodnotou v registru CCP1H.

Periférie mikrokontroléru – USART

Další periférií použitého mikrokontroléru je jednotka USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter), již z anglického názvu můžeme vydedukovat, že se jedná o jednotku, která zajišťuje sériový synchronní (SPI) nebo asynchronní přenos (SCI). Tato jednotka může být nakonfigurována jako plně duplexní asynchronní systém. Toto se používá pro komunikaci s perifériemi typu osobní počítač. Další možnou konfigurací je poloviční duplexní synchronní systém. Toto se používá pro komunikaci s integrovanými obvody (sériové paměti, A/D a D/A převodníky).

Existují tři konfigurační režimy. Synchronní master režim pracující jako poloviční duplexní, což znamená, že umožňuje pouze příjem nebo pouze vysílání. Dalším režimem je synchronní slave režim, který rovněž pracuje jako poloviční duplex. Pro komunikaci s počítačem se používá asynchronní režim, jenž pracuje jako plně duplexní, což znamená, že umožňuje současný příjem a vysílání. Tento režim je využíván v této diplomové práci.

V asynchronním režimu se používá standartní formát slova, a to vždy jeden start-bit, následuje 8 nebo 9 datových bitů a nakonec jeden stop-bit. Nastavení přenosové rychlosti zajišťuje zabudovaný generátor přenosové rychlosti. Příjem a vysílání bitů probíhá od nejméně významného bitu k nejvýznamnějšímu. Asynchronní část jednotky USART se skládá ze čtyř nejdůležitějších částí:

- generátor přenosové rychlosti,
- vzorkovací obvod,
- asynchronní vysílač,
- asynchronní přijímač.

Přijímač a vysílač jsou funkčně nezávislé. Společnou mají ale přenosovou rychlost a formát. Parita se nastavuje programově, hardwarová není podporována. Jednotka USART vysílá data na pinu označovaném jako TX (transmit) a přijímá data na pinu označovaném RX (receive). Pro komunikaci se tedy používají dva vodiče. Pokud neprobíhá komunikace (tj. příjem nebo vysílání), tak je úroveň signálu nastavena v log 1. Vysílání se zahajuje změnou hodnoty signálu na log 0 po dobu jednoho bitu. Jak již bylo popsáno výše, data se posílají v pořadí od nejméně významného bitu k nejvýznamnějšímu. Po odvysílání stop-bitu může začít přenos dalšího bajtu.

Přenosová rychlost se udává v počtu bitů za sekundu neboli v Bd „baudech“. Dobu trvání jednoho bitu je možné snadno vypočítat, jelikož je toto číslo převrácená hodnota přenosové rychlosti.

Vstupy a výstupy jednotky USART používají logické úrovně typicky 5 V nebo 3,3 V. Aby bylo možné tento signál dále používat, je nutné ho převést na standardní úrovně pomocí převodníku. Nejběžnější typ převodníku je MAX232, který převádí úrovně pro linku RS232. Ta se však již nenachází v žádném moderním počítači a v dnešní době je už poměrně zastaralá. Pro zajištění kompatibility s většinou PC byl proto použit převodník firmy FTDI FT232BL, který zajišťuje převod z USB na USART rozhraní. Značnou výhodou tohoto řešení je, že celý USB protokol je obsluhován samotným čipem a není tak třeba žádné programování firmware. Jeho základní parametry jsou:

- přenosová rychlost 300 bit/s až 3 Mbit/s,
- rozhraní UART podporuje 7/8 datových bitů, 1/2 stop bity a několik druhů parity,
- možnost práce s 5 V i 3,3 V logikou,
- napájecí napětí v rozsahu 4,35 až 5,25, přičemž je možné ho napájet přímo z USB,
- kompatibilní s USB 1.1 i 2.0.

Schéma zapojení převodníku je převzato z dokumentace. Samotné vytvoření převodníku je velmi jednoduché, stačí připojit k integrovanému obvodu pár externích součástek. K propojení mezi převodníkem a mikrokontrolérem postačí pouze propojit dané vývody RX a TX. Pro funkci převodníku není nezbytné používat ani připojenou externí paměť typu EEPROM. Ta slouží pouze pro uložení doplňkových dat, jako je např. unikátní číslo daného převodníku a další. Pro indikaci provozu je připojena k pinům TXLED a RXLED dioda přes 220R rezistor, její osazení však není nutné. K převodníku jsou rovněž dodávány volně šiřitelné ovladače pro PC.

3.3.2 Deska koncových stupňů pro řízení ventilátoru a topné spirály

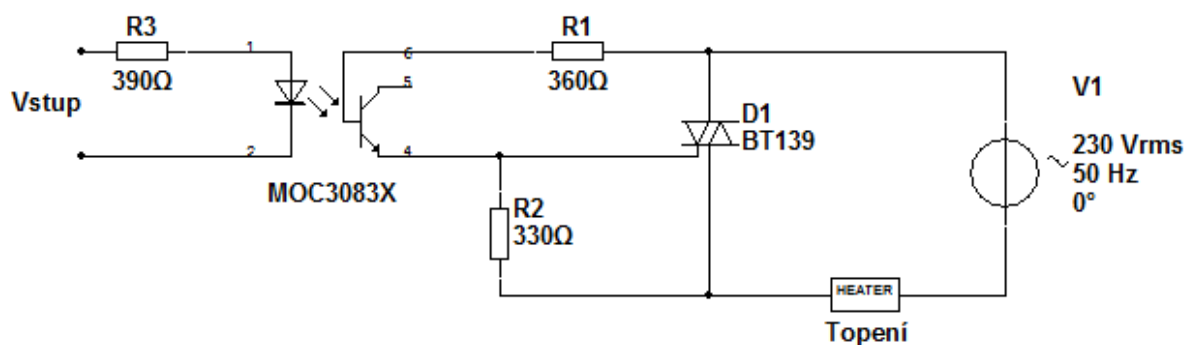
Tato deska je vyrobena jako oboustranná. Je na ní umístěn triak pro spínání odporové topné spirály a mosfet tranzistory IRF540N pro generování PWM signálu, který slouží k řízení otáček ventilátoru. Samotná deska je připojena k základní desce pomocí 5 pinového konektoru.

Koncový stupeň ventilátoru - PWM

Výstupní PWM signál z mikrokontroléru je přiváděn na budící obvod, který je tvořen integrovaným obvodem 74HCT04. Tento obvod v sobě ukrývá šestici invertorů, z nichž pět jich je zapojeno paralelně, aby bylo možné dodávat dostatečný proud pro spínání výkonového tranzistoru, a zbývající invertor je k nim připojen sériově, aby nedocházelo k invertování PWM signálu generovaného pomocí mikrokontroléru.

Výkonový tranzistor je použit unipolární typu N-MOS s označením IRF540N. Dle parametrů výrobce může tento tranzistor spínat napětí do velikosti 100 V a proud až 33 A. Jeho maximální výkonová ztráta je 130 W. Statický odpor mezi elektrodami „drain-source“ je v sepnutém stavu 0,044 Ω. Ventilátor použitý pro toto stanoviště má jmenovité napájení 48 V a výkon až 300 W.

Pro signalizaci provozu zde slouží dioda LED1, která je připojena přes rezistor 2K2, který zajišťuje dostatečně malý proud, aby nedocházelo k zatěžování mikrokontroléru. Výsledné zapojení je na Obr. 21.

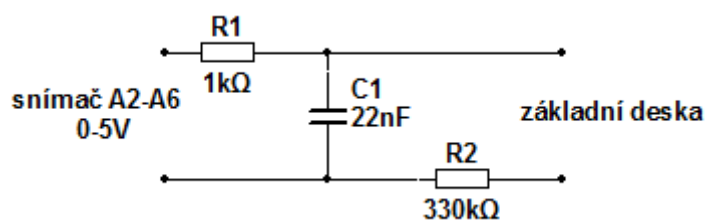


Obr. 22 Schéma zapojení spínání odporové topné spirály TL431CLP (výstup ze simulačního programu Multisim) [13]

3.3.3 Deska s analogovými vstupy

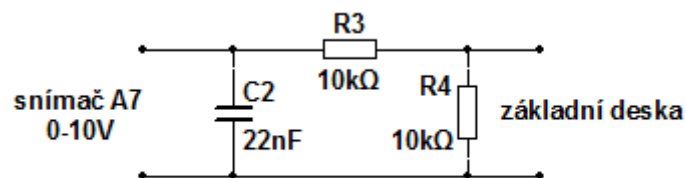
Poslední oboustrannou deskou plošného spoje je deska s analogovými vstupy. Na této desce je zároveň umístěn i referenční zdroj pro A/D převodník mikrokontroléru PIC18F4525. Popis a princip funkce tohoto převodníku již byl popsán výše a nebudu se jím dále zabývat. Deska s analogovými vstupy je propojena se základní deskou skrze 10 pinový konektor.

Je zde umístěno celkem sedm analogových vstupů s celkem třemi druhy zapojení. Pět z analogových vstupů je navrženo pro rozsah napětí 0 až 5 V. Každý z nich má předřazen dolnoproustní filtr pro blokaci vysokých kmitočtů. Filtr má nastavenou zlomovou frekvenci 7234 Hz. ($R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 22 \text{ nF}$). Dále zapojení obsahuje rezistor pro vybíjení vnitřních kapacit převodníku. Schéma zapojení této části je na Obr. 23.



Obr. 23 Schéma zapojení analogových vstupů A2 až A6 TL431CLP

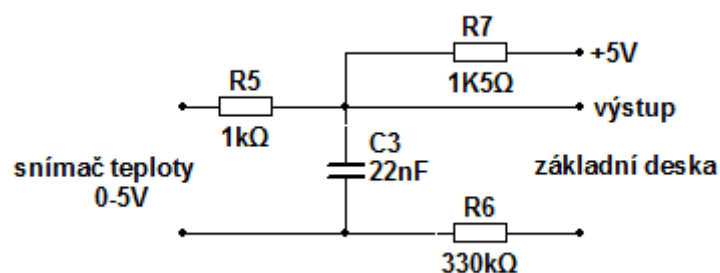
Dalším analogovým vstupem je vstup A7. Tento vstup má rozsah napětí 0 až 10 V. Je toho docíleno jednoduchým odporovým děličem. Tento vstup se používá pro dálkové ovládání měření. Schéma zapojení je na Obr. 24.



Obr. 24 Schéma zapojení analogového vstupu A7 TL431CLP

Jako poslední je vstup A7. Tento vstup slouží pro připojení teplotního čidla LM335. Jelikož toto čidlo potřebuje ke své činnosti napájení, je k tomu zapojení patřičně upraveno. Toto zapojení je převzato od výrobce čidla LM335.

Čidlo teploty LM335 je standardně dodáváno v pouzdru TO92. Jedná se monokrystalický teplotní senzor, který využívá Zenerova jevu. Princip funkce je velmi jednoduchý, dioda uvnitř čidla je teplotně závislá a využívá se ke stabilizaci napětí na určitou hodnotu, přičemž pracuje v závěrném směru. Charakteristika je pak dána pouze strmostí (pro LM335 je to 10 mV/°C) a není tak třeba žádné další linearizace. Využívá se pouze přesné reference, se kterou se stabilizované napětí na diodě srovná. Rozsah měřitelných teplot je od -40°C do 100°C. Nevýhodou je pak velká odchylka od přesné hodnoty, která je 1°C. Kompenzaci je možné řešit přes přesný trimr připojený na třetí vývod čidla. Schéma zapojení analogového vstupu A1 pro teplotní čidlo na desce s analogovými vstupy je na Obr. 25.



Obr. 25 Schéma zapojení analogového vstupu A1 – teplotní čidlo

3.3.4 Deska zdroje

Poslední deska plošného spoje je vyrobena pouze jako jednovrstvá. Je navržena tak, že tvoří dvojici výstupních napětí, a to 12 V a 5 V, přičemž je vytvořena jedna 12 V větev a dvě 5 V větve. Pro napájení celé elektroniky stanoviště je potřeba použít napájecí napětí o rozsahu 15-18 V a proud alespoň 4 A.

12 V větev je řešena pomocí stabilizátoru LM7812, rovněž je pomocí podobného stabilizátoru (nyní LM7805) řešena i jedna 5 V větev. Stabilizátory označené jako 78xx jsou určeny pro stabilizování kladného napětí vůči zemi. Stabilizátor má integrovanou proudovou ochranu 1 A (zdroj s tímto IO tedy není třeba vybavovat další proudovou ochranou) a je tedy tento proud schopný dodávat.

Zapojení tohoto stabilizátoru je velmi jednoduché, prakticky celé totiž spočívá v připojení GND na zem, přivedení napětí, které chceme stabilizovat na vstup a odvedení stabilizovaného napětí

z výstupu. Na vstup se dává větší filtrační kondenzátor podle potřeby (vyžaduje se, pokud je regulátor umístěn s výrazným odstupem od filtru napájecího zdroje). Na výstupu je blokovací kondenzátor 100n, který zabraňuje průniku vysokofrekvenčního rušení. Při připojení kondenzátoru s příliš vysokou kapacitou na výstup může docházet k aktivaci proudové pojistky stabilizátoru.

Jako poslední je na desce zdroje 5 V větev sloužící jako referenční napětí pro snímače hmotnosti vzduchu. Je zde využíváno stejné zapojení, jako v případě referenčního zdroje pro A/D převodník. Proto nebude již jeho zapojení dále popisováno.

Výpočet chladiče pro stabilizátor LM7812

Z dokumentace ke stabilizátoru jsou vyčteny následující hodnoty sloužící pro výpočet:

$$T_j = 125^{\circ}\text{C}$$

$$R_{TH\ j-c} = 5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{TH\ j-a} = 65 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Uvažujeme teplotu okolí $T_a = 45^{\circ}\text{C}$, jelikož se zařízení bude nacházet v uzavřené krabici.

Výpočet P_{TOT} pro LM7812:

$$P_{TOT} = I_{MAX} \cdot (U_{VST} - U_{VYST}) = 1 \cdot (18 - 12) = 6 \text{ W} \quad (24)$$

U_{VST} ... vstupní napětí stabilizátoru [V]

U_{VYST} ... výstupní napětí stabilizátoru [V]

I_{MAX} ... maximální odebíraný proud [A]

Při předpokladu proudu až 1 A a napájecího napětí až 18 V dostaneme vypočtený výkon 6 W, proto je vhodné na tento obvod připevnit chladič.

Výpočet celkového tepelného odporu R_{TH}

$$R_{TH} = \frac{T_j - T_a}{P_{TOT}} = \frac{125 - 45}{6} = 13,33^{\circ}\text{C/W} \quad (25)$$

T_j ... maximální teplota přechodu

T_a ... teplota okolí, uvažujeme 45°C , jelikož se zařízení bude nacházet v uzavřené krabici

R_{TH} ... celkový tepelný odpor [$^{\circ}\text{C/W}$]

P_{TOT} ... maximální ztrátový výkon

Výpočet tepelného odporu chladiče $R_{TH\ h-a}$

$$R_{TH\ h-a} = R_{TH} - (R_{TH\ j-c} + R_{TH\ c-h}) \quad (26)$$

$$R_{TH\ h-a} = 13,33 - (5 + 0,8) = 8,25\ ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (27)$$

(28)

$R_{TH\ h-a}$... tepelný odpor chladiče [$^\circ\text{C}/\text{W}$]

$R_{TH\ j-c}$... tepelný odpor mezi čipem a jeho pouzdrem [$^\circ\text{C}/\text{W}$]

$R_{TH\ c-h}$... tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem, volíme $0,8\ ^\circ\text{C}/\text{W}$ pro izolovaný slídou

Na stabilizátor LM7812 přišroubujeme odpovídající chladič, který se nejvíce blíží hodnotě $8,25\ ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Výpočet chladiče pro stabilizátor LM7805

Z dokumentace ke stabilizátoru jsou vyčteny následující hodnoty sloužící pro výpočet:

$$T_j = 125^\circ\text{C}$$

$$R_{TH\ j-c} = 5\ \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{TH\ j-a} = 65\ \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Uvažujeme teplotu okolí $T_a = 45^\circ\text{C}$.

Výpočet P_{TOT} pro LM7805:

$$P_{TOT} = I_{MAX} \cdot (U_{VST} - U_{VYST}) = 1 \cdot (18 - 5) = 13\ \text{W} \quad (28)$$

Při předpokladu proudu $1\ \text{A}$ a napájecího napětí až $18\ \text{V}$ dostaneme vypočtený výkon $13\ \text{W}$, proto je vhodné na tento obvod připevnit chladič.

Výpočet celkového tepelného odporu R_{TH}

$$R_{TH} = \frac{T_j - T_a}{P_{TOT}} = \frac{125 - 45}{15} = 6,15\ ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (29)$$

Výpočet tepelného odporu chladiče $R_{TH\ h-a}$

$$R_{TH\ h-a} = R_{TH} - (R_{TH\ j-c} + R_{TH\ c-h}) \quad (30)$$

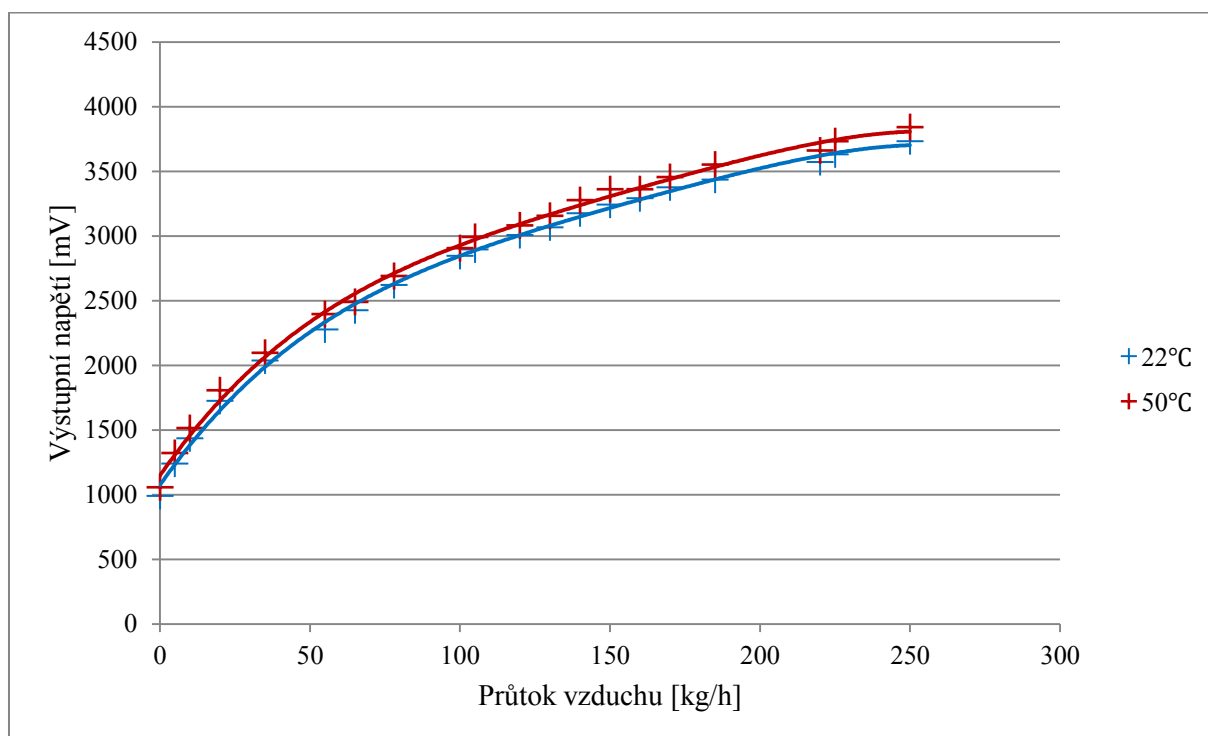
$$R_{TH\ h-a} = 6,15 - (5 + 0,8) = 0,35\ ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (31)$$

Na stabilizátor LM7805 přišroubujeme odpovídající chladič, který se nejvíce blíží hodnotě $0,35\ ^\circ\text{C}/\text{W}$.

3.4 Ověření funkčnosti stanoviště a laboratorní úloha

3.4.1 Měření snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu

Funkčnost stanoviště byla ověřena měřením na třech různých snímačích hmotnosti vzduchu a na jednom snímači tlaku. Pro měření snímače hmotnosti nasávaného vzduchu byla použita vyrobená redukce, na které je ventilátor připevněn. Dle dokumentace od výrobce je možný průtok až 1050 m³/h vzduchu. Jelikož použitá redukce značně zmenšuje přívodní otvor vzduchu do ventilátoru, není možné reálně dosáhnout průtoku 1050 m³/h vzduchu, protože ventilátor není schopen vyvinout velký výtlač.



Obr. 26 Změřená závislost průtoku vzduchu na napětí snímače BOSCH 0 280 217 121

Měření probíhalo při dvou různých nastavených teplotách, aby se ukázala odchylka převodních charakteristik snímačů hmotnosti vzduchu při různých teplotách. Z grafu na Obr. 26 Změřená závislost průtoku vzduchu na napětí snímače BOSCH 0 280 217 121 je patrné, že měřený snímač je na teplotě mírně závislý. Rovněž byla měřením ověřena funkčnost regulace teploty odporové topné spirály, která udržuje nastavenou teplotu. Výrobce snímače neposkytuje informaci, jež by stanovila měřitelný rozsah měřeného snímače (závislost napětí na hmotnostním průtoku vzduchu), je tedy nutné vycházet ze závislosti referenčního snímače a následně tyto charakteristiky porovnat. Dalším způsobem jak zkontrolovat správnost měření je kontrola dat z dílenské příručky od automobilu, pro který je tento snímač určen. Tím je možné zjistit, zda námi změřený rozsah snímače na tomto stanovišti je dostatečný.

Test snímače hmotnosti nasávaného vzduchu se provádí ve vozidle následujícím způsobem:

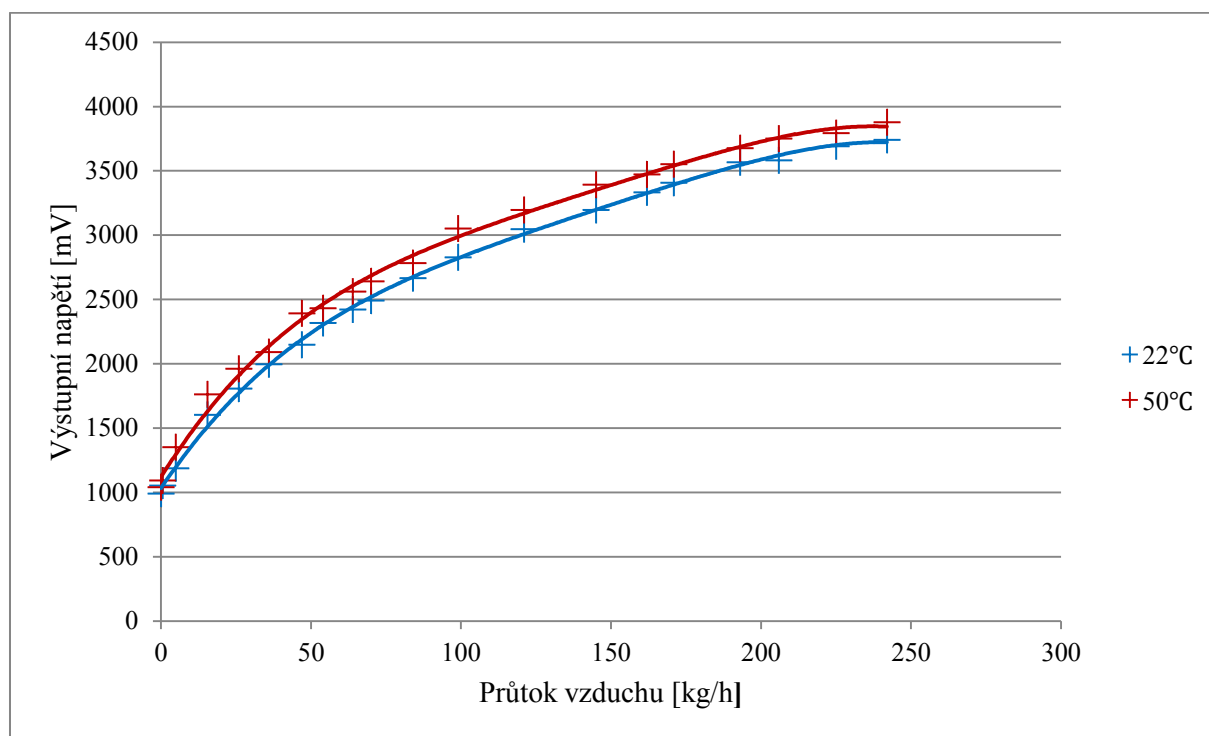
- připojení diagnostického testeru, vypsát blok naměřených hodnot skupiny 010,
- pozorovat hodnotu v poli zobrazení 1 – množství vzduchu.

Požadovaná hodnota (pro motor AGR) při volnoběhu musí být 230 až 370 mg/zdvih (25 až 40 kg/h). Pokud je požadovaná hodnota dosažena, je možné pokračovat v testu následujícím způsobem:

- vozidlo se zařazeným 3. rychlostním stupněm zrychlit z asi 1500 ot/min na plný plyn,
- při asi 3000 ot/min odečíst a zaznamenat zobrazenou hodnotu aktuální hmotnosti vzduchu,
- poloha plynového pedálu musí být při odečtu na 100% dráhy.

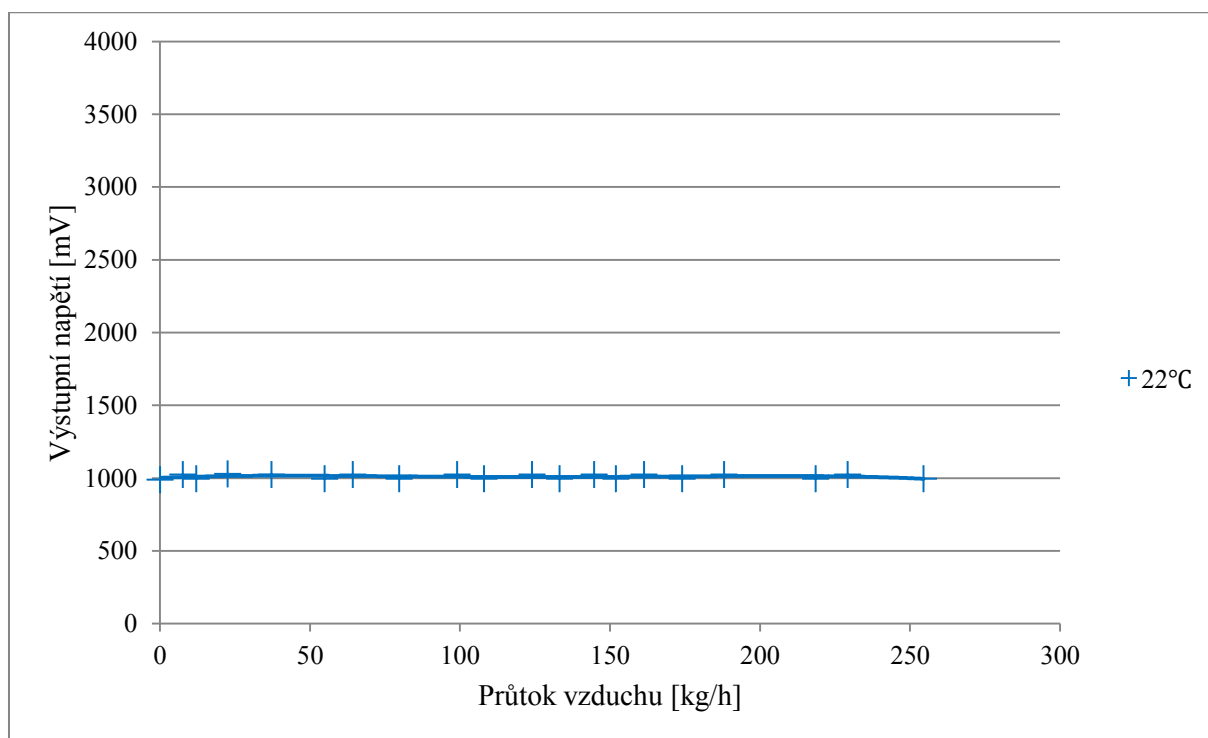
Požadovaná hodnota musí být větší jak 750 až 800 mg/zdvih (270 až 288 kg/h). Tento údaj je pro stanovení rozsahu důležitý. Jak můžeme vidět z naměřených dat, na stanovišti bylo dosaženo maximální hodnoty množství protékajícího vzduchu přes snímače cca 250 kg/h. Při měření na vozidle by mělo být dosaženo hodnoty větší jak 270 kg/h při 3000 ot/min. Je možné tedy říci, že na stanovišti můžeme bezpečně otestovat velkou část závislosti měřeného snímače a tak rozpoznat, zda měřený snímač je vadný, či nikoliv.

Změřená závislost pro druhý měřený snímač je na obrázku níže. Teplotní rozdíl je zde menší než u předchozího snímače. Oba měřené snímače byly určeny pro stejný typ motoru, přičemž jejich změřené závislosti jsou podobné. Dle změřených dat můžeme říci, že jsou oba snímače v pořádku.



Obr. 27 Změřená závislost snímače BOSCH 0 986 280 202

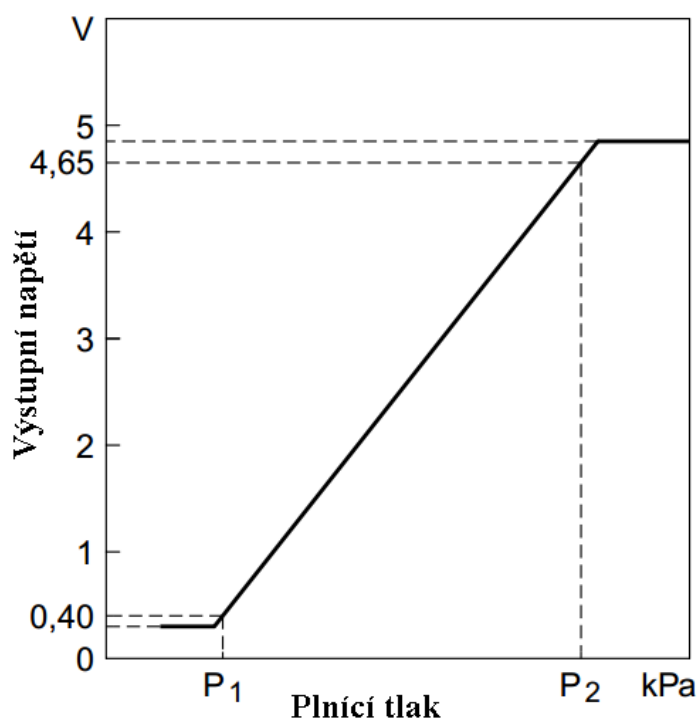
Jako poslední bylo provedeno měření závislosti snímače hmotnosti nasávaného vzduchu, který byl označen v autoservise jako vadný. Toto tvrzení bylo tedy následně podloženo měřením. Změřená závislost vadného snímače je na obrázku níže a je z ní patrné, že při postupném zvyšování průtoku vzduchu se výstupní napětí snímače nemění a zůstává na hodnotě 1 V. Vzhledem k výsledkům již prvního měření při teplotě 22 °C nebylo provedeno měření pro teplotu 50 °C, jelikož by to bylo bezpředmětné.



Obr. 28 Změřená závislost vadného snímače BOSCH 0 280 217 121

3.4.2 Měření snímače tlaku

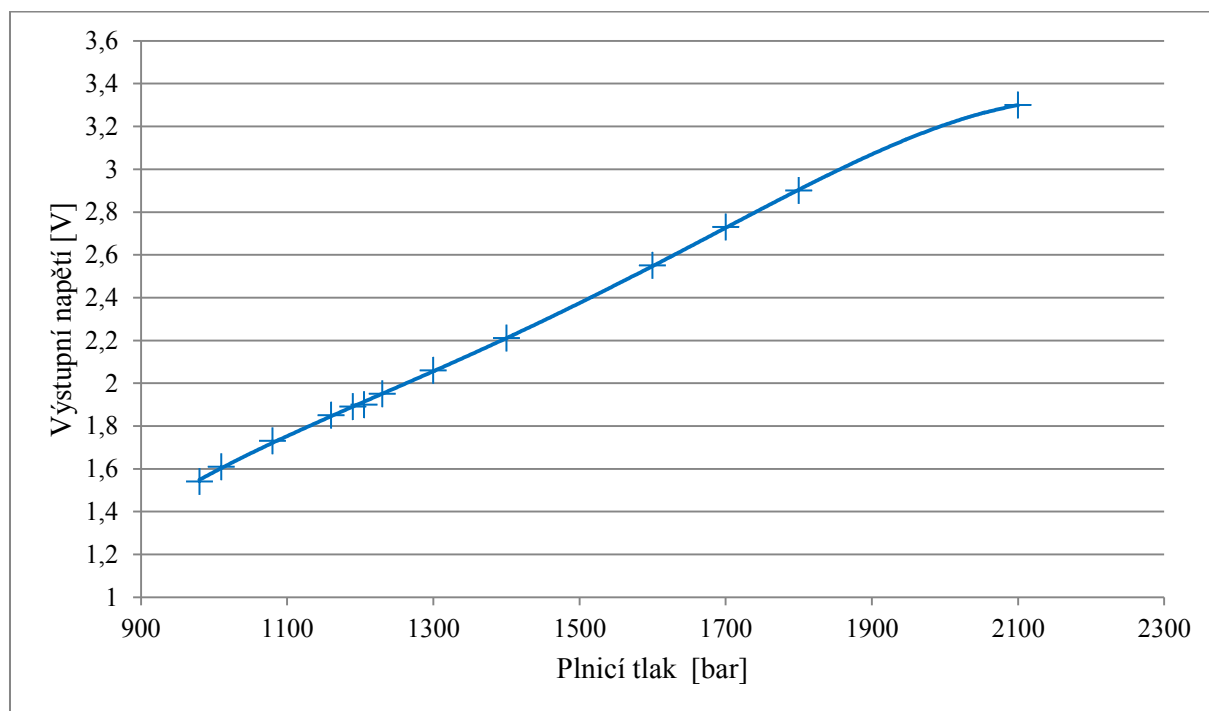
Pro měření snímače tlaku je potřeba využít turbodmychadla, které je na laboratorním stanovišti osazeno. Při měření tlaku pouze s použitým ventilátorem není možné proměřit celou charakteristiku snímače tlaku, jelikož ventilátor není chopen vytvořit skoro žádný tlak. Toto bylo prokázáno i měřením na snímači tlaku BOSCH 0 281 002 399, kdy při atmosférickém tlaku bylo naměřeno výstupní napětí snímače o hodnotě 1905 mV a při ventilátoru puštěném na plný výkon bylo toto napětí na hodnotě 1888 mV. Vzhledem k tomu, že měřený snímač tlaku má závislost umístěnou v rozsahu od 0 až do 5 V, nelze prokázat správnou funkčnost tohoto snímače v celém rozsahu. Dle závislosti dodávané výrobcem bylo zjištěno, že naměřená hodnota výstupního napětí 1905 mV odpovídá přibližně hodnotě 1,025 bar, tedy aktuálnímu barometrickému tlaku. Změřená hodnota je proto správná.



Obr. 29 Závislost tlaku na napětí snímače BOSCH 0 281 002 399 dodávaná výrobcem [14]

Legenda k obrázku 29: $P_1 = 0,2$ bar, $P_2 = 2,5$ bar

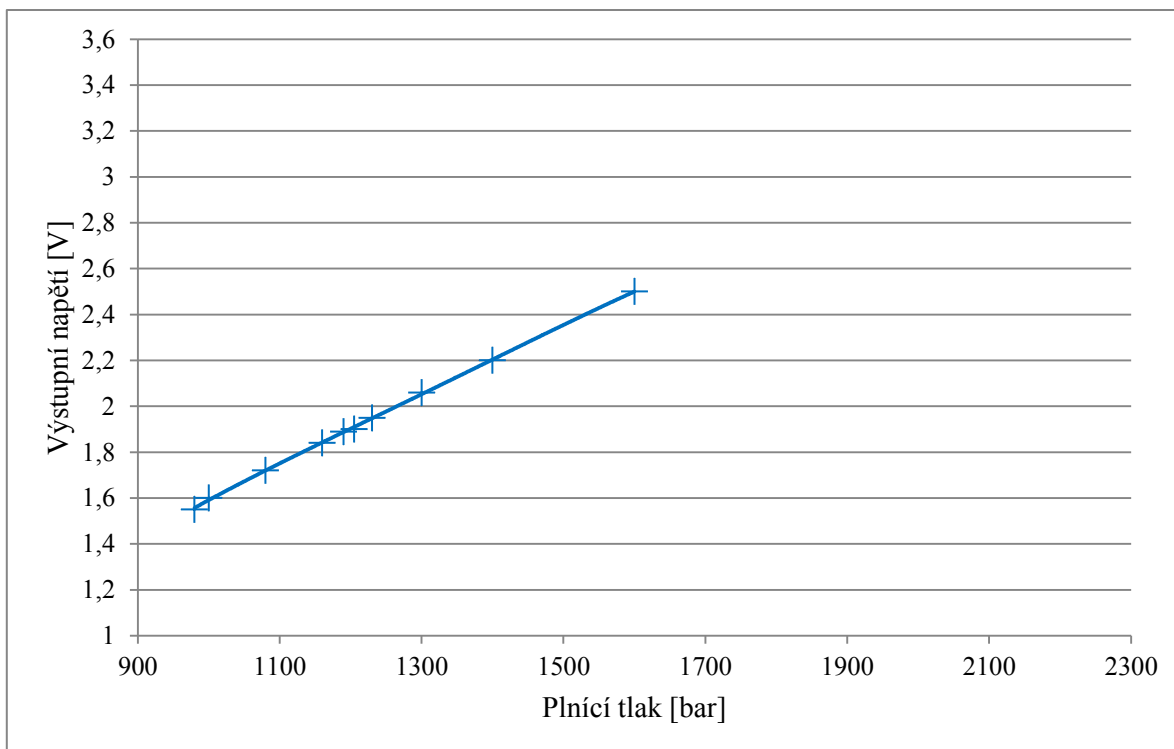
Po připojení turbodmyhadla a uzavření škrticí klapky osazené na stanovišti je možné měřit větší část závislosti snímače plicního tlaku. Pro měření byl použit snímač tlaku výrobce HYUNDAI s číslem 9 940 930 502. Bohužel výrobce k tomuto snímači nedodává žádnou dokumentaci, tj. ani závislost, se kterou by bylo možné naměřené výsledky porovnat a určit tak, zda snímač pracuje správně. Proto byla vytvořena vlastní závislost měřením snímače přímo ve vozidle, která byla následně použita pro porovnání se změřenou závislostí na laboratorním stanovišti.



Obr. 30 Změřená závislost snímače tlaku získaná měřením na vozidle Hyundai i30

Plnicí tlak není možné pomocí řídicí elektroniky udržovat na nastavené hodnotě, protože pro pohon turbodmyhadla je nezbytné jeho připojení na zdroj stlačeného vzduchu, který lze získat například použitím dostatečně výkonného kompresoru. Při tomto měření je nezbytné zajistit dostatečné mazání turbodmyhadla, je proto nutné kontrolovat hladinu oleje v zásobníku.

Závislost změřená na laboratorním stanovišti je na obrázku níže. Na stanovišti bylo pomocí turbodmyhadla dosaženo plicního tlaku až 1,6 bar. Dále je možné konstatovat, že získaná závislost je stejná se závislostí změřenou přímo na vozidle. Tím je ověřena správná funkčnost snímače i měřicího stanoviště.



Obr. 31 Závislost snímače tlaku získaná pomocí měřicího stanoviště

3.4.3 Laboratorní úloha

Jako poslední část této diplomové práce byla vypracována laboratorní úloha, která bude sloužit pro výuku předmětu Diagnostika a testování vozidel. Vypracovaný vzor této laboratorní úlohy je umístěn v přílohách. Pomocí navrženého stanoviště mohou studenti snadno změřit závislosti různých snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu až do množství protékajícího vzduchu 250 kg/h, rovněž je mohou otestovat v závislosti na teplotě. Při zapojení turbodmychadla je dále možné testovat závislosti různých druhů snímačů plnicího tlaku až do hodnoty plnicího tlaku 1,6 bar.

4. Závěr

V prvním bodu teoretické části této diplomové práce byl vysvětlen princip řízení motoru a možné způsoby regulace složení směsi (palivo – vzduch). Dále byly uvedeny vzory výpočtu efektivního výkonu motoru a hmotnosti nasávaného vzduchu pro různé typy vozidel. Pro výpočet hmotnosti nasávaného vzduchu je nutné znát tlak přeplňování pro konkrétní motor. Tento tlak byl změřen pomocí diagnostického systému VCDS a byl použit pro následný výpočet hmotnosti nasávaného vzduchu. Pro vozidlo Škoda Superb 1.9 TDI 77 kW byla vypočtena hodnota hmotnosti nasávaného vzduchu při plném zatížení 464 kg/h, u vozidla Audi A6 2.7 TDI 132 kW to bylo 545 kg/h a nakonec pro vozidlo VW Transporter 2.5 TDI 96kW to bylo 490 kg/h. Ve druhém a třetím bodě této diplomové práce byla vypracována teoretická rešerše, v níž jsou podrobně vysvětleny principy vybraných typů snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu.

Praktickým návrhem laboratorního stanoviště pro měření snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu se zabývá praktická část této práce. Návrh je rozdělen na čtyři základní body. V prvním bodě byly popsány základní požadavky, které jsou kladeny na konstrukci stanoviště. Ve druhém bodě byla řešena problematika mechanické části stanoviště, přičemž byl kladen velký důraz na snadnou výměnu všech použitých komponent a na možnost budoucího upgradu o další elektromechanické systémy. Ve třetím bodě byla navržena elektrická koncepce celého stanoviště. V posledním, tedy čtvrtém bodě, byla ověřována funkčnost stanoviště při měření vybraných snímačů tlaku a hmotnosti nasávaného vzduchu.

Z praktického měření na snímačích hmotnosti nasávaného vzduchu byl stanoven možný rozsah měření hmotnosti vzduchu na stanovišti s využitím ventilátoru na 0 až 250 kg/h, přičemž použitý ventilátor má dle specifikace výrobce stanoven maximální průtok vzduchu až na 1050 m³/h (1340 kg/h). Při praktickém měření bylo zjištěno, že při použití redukce pro připojení ventilátoru ke stanovišti je maximální možná měřená hmotnost protékajícího vzduchu 250 kg/h. Je to způsobeno značným „přiškrcením“ ventilátoru na straně sání vzduchu přes použitou redukci, a jelikož axiální ventilátory nemají dostatečný výtlak vzduchu, značně klesne maximální průtok vzduchu ventilátorem. Při měření byly ověřeny tři různé snímače hmotnosti vzduchu, přičemž dva z nich byly funkční a jeden byl dodán jako nefunkční. Snímače byly určeny pro motory s kódem AGR (1.9 TDI 66 kW). Jelikož výrobci neuvádějí ke svým snímačům závislosti výstupního napětí na hmotnosti protékajícího vzduchu, bylo nutné porovnávat přechodové charakteristiky s referenčním snímačem. Zároveň je vhodné získat potřebná data z dílenské příručky vozu, kde jsou standardně tyto snímače namontovány a ujistit se tak, že je možné změřit kompletní závislost snímače. Při 3000 ot/min by měla být pro motor AGR udávána měřená hmotnost vzduchu větší jak 270 kg/h, když je snímač v pořádku. Stanoviště tak dokáže ověřit značnou část závislosti snímače. Jistou výjimkou mohou být motory větších výkonů, jako jsou např. motory, pro které byl proveden výpočet v teoretické části. V tomto případě lze změřit pouze část závislosti snímačů, jelikož jejich rozsah je větší. Všechny změřené závislosti jsou vloženy v kapitole 3.4.1 s názvem: Měření snímačů hmotnosti nasávaného vzduchu.

Jako poslední byla změřena závislost výstupního napětí na tlaku snímače plnicího tlaku HYUNDAI 9 490 930 502 pomocí přímého měření ve vozidle a na stanovišti. Maximální naměřená hodnota plnicího tlaku na stanovišti byla 1,6 bar při použití turbodmyhadla. Ve vozidle bylo možné dosáhnout hodnoty plnicího tlaku až 2,1 bar. Dále bylo provedeno měření snímače tlaku BOSCH 0 281 002 399 pouze pomocí připojeného ventilátoru. Jelikož ventilátor není schopen generovat velký tlak, není možné změřit závislost žádného připojeného snímače plnicího tlaku. Bylo proto pouze ověřeno výstupní napětí při atmosférickém tlaku. Při porovnání se závislostí dodávanou výrobcem bylo ověřeno, že změřená hodnota napětí je správná.

5. Použité zdroje a citace

- [1] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol* [online]. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. [cit. 2013-02-05]. ISBN 978-80-247-3475-0. Dostupné z: books.google.cz/books?isbn=8024734753
- [2] VLK, František. *Elektronické systémy motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2002, vii, 299-592 s. ISBN 80-238-7282-6.
- [3] SCHOLZ, Celestýn. *Základy teorie vozidel a vozidlových motorů: Řízení výkonu automobilového PSM* [online]. 2009, 9 s. [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/ZVM/ZVM-4pr.pdf>
- [4] JIČÍNSKÝ, Štěpán. *Praktická dílna. AutoExpert: časopis profesionálů v autoopravárenství: technika - autodílna - obchod*. Praha: Autopress, s.r.o., 2012, roč. 2012, č. 3, s. 16. ISSN 1211-2380.
- [5] JIČÍNSKÝ, Štěpán. *Osciloskop a jeho využití v autoopravárenské praxi*. 1. vyd. Praha: Grada, 2006, 238 s. ISBN 80-247-1417-5.
- [6] ŠKODA AUTO a.s. *Benzínové motory 1,8 l/110 kW a 1,8 l/92 kW*. Praha 4: [ŠKODA AUTO a.s.], 1998. 35 s.
- [7] VOLKSWAGEN AG. *Self-study Programme 358: Hot-film Air-mass Meter HFM 6*. Wolfsburg: [VOLKSWAGEN AG], 2007. 19 s.
- [8] ŠKODA AUTO a.s. *Vznětový motor 1,9 l TDI*. Praha 4: [ŠKODA AUTO a.s.], 1996. 59 s.
- [9] ZABLER, Dr.-Ing. Erich, et al. *Snímače v motorových vozidlech*. Praha: Robert Bosch odbytová s.r.o., 2001. 148 s. ISBN 80-903132-5-6.
- [10] MATOUŠEK, David. *C pro mikrokontroléry PIC: práce s PIC18F452 a PIC18F1220 v jazyce C*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-413-2.
- [11] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PIC18F2525/2620/4525/4620 Data Sheet: 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D and nanoWatt Technology*. 2008. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39626e.pdf>
- [12] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. *TL431/TL431A: Programmable Shunt Regulator*. 2011. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/TL/TL431A.pdf>
- [13] MOTOROLA INC. *6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output: MOC3083*. 1995. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5044/MOTOROLA/MOC3083.html>
- [14] BOSCH. *Medium-resistant absolute-pressure sensors Micromechanical type: Measurement of pressure in gases and liquid mediums up to 600 kPa*. [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://nyet.org/cars/info/Map_Sensor_Technical_Specification.pdf

6. Seznam obrázků a příloh

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Schéma kvantitativní regulace [3]..... | 9 |
| Obr. 2 Schéma kvalitativní regulace [3]..... | 10 |
| Obr. 3 Přepřínovaný vznětový motor [3]..... | 10 |
| Obr. 4 Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu s vyhříváním filmem typu HFM 2 [5]..... | 15 |
| Obr. 5 Snímač s vyhříváním filmem HFM 2 (substrát) [5]..... | 16 |
| Obr. 6 Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu s vyhříváním filmem typu HFM 5 [6]..... | 17 |
| Obr. 7 Teplotní profily na měřicím prvku [5]..... | 18 |
| Obr. 8 Výstupní napětí měřiče hmotnosti vzduchu [5]..... | 19 |
| Obr. 9 Konstrukce snímače hmotnosti vzduchu HFM 6 [7]..... | 20 |
| Obr. 10 Výstupní signál snímače HFM 6 [7]..... | 20 |
| Obr. 11 Přehled motoru 1.9 TDI AGR 66kW [8]..... | 21 |
| Obr. 12 Princip barometrického neintegrovaného snímače [6]..... | 22 |
| Obr. 13 Princip tlustovrstvého snímače tlaku a jeho zapojení [9]..... | 23 |
| Obr. 14 Měřicí buňka tlaku s referenčním vakuem na straně struktury [9]..... | 24 |
| Obr. 15 Mikromechanický snímač tlaku s referenčním vakuem na straně struktury [9]..... | 24 |
| Obr. 16 Blokové schéma laboratorního stanoviště..... | 27 |
| Obr. 17 Laboratorního stanoviště – reálná fotografie..... | 28 |
| Obr. 18 Blokové schéma elektroniky měřicího stanoviště..... | 29 |
| Obr. 19 Principiální blokové schéma kompenzačního A/D převodníku s postupnou aproximací..... | 30 |
| Obr. 20 Přesná napěťová reference pro A/D převodník pomocí obvodu TL431CLP (výstup ze simulačního programu Multisim) [12]..... | 31 |
| Obr. 21 Schéma zapojení koncového stupně ventilátoru..... | 34 |
| Obr. 22 Schéma zapojení spínání odporové topné spirály TL431CLP (výstup ze simulačního programu Multisim) [13]..... | 35 |
| Obr. 23 Schéma zapojení analogových vstupů A2 až A6 TL431CLP..... | 35 |
| Obr. 24 Schéma zapojení analogového vstupu A7 TL431CLP..... | 36 |
| Obr. 25 Schéma zapojení analogového vstupu A1 – teplotní čidlo..... | 36 |
| Obr. 26 Změřená závislost průtoku vzduchu na napětí snímače BOSCH 0 280 217 121..... | 39 |
| Obr. 27 Změřená závislost snímače BOSCH 0 986 280 202..... | 40 |
| Obr. 28 Změřená závislost vadného snímače BOSCH 0 280 217 121..... | 41 |
| Obr. 29 Závislost tlaku na napětí snímače BOSCH 0 281 002 399 dodávaná výrobcem [14]..... | 42 |
| Obr. 30 Změřená závislost snímače tlaku získaná měřením na vozidle Hyundai i30..... | 43 |
| Obr. 31 Závislost snímače tlaku získaná pomocí měřicího stanoviště..... | 44 |

Seznam příloh

- I. Základní deska**
 - a. Schéma hlavní části
 - b. Schéma USB převodníku
 - c. DPS - spoje dolní vrstvy
 - d. DPS - spoje horní vrstvy
 - e. Rozmístění součástek
 - f. Seznam součástek
- II. Výkonová část Chyba! Záložka není definována.**
 - a. schéma desky výkonových výstupů
 - b. DPS – spoje dolní vrstvy
 - c. DPS – spoje horní vrstvy
 - d. Rozmístění součástek
 - e. Seznam součástek
- III. Analogová část**
 - a. schéma desky analogových vstupů
 - b. DPS – spoje dolní vrstvy
 - c. DPS – spoje horní vrstvy
 - d. Rozmístění součástek
- IV. Zdrojová část**
 - a. Schéma desky zdroje
 - b. DPS – spoje dolní vrstvy
 - c. Rozmístění součástek
 - d. Seznam součástek
- V. Tlačítka**
 - a. Schéma zapojení
 - b. DPS – spoje dolní vrstvy
 - c. Rozmístění součástek
 - d. Seznam součástek
- VI. Laboratorní úloha pro praktickou výuku**
- VII. Fotografie osazené a oživené řídicí elektroniky laboratorního stanoviště**